



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

듀플렉스 저비중강의 국소 변형 분포와 미세조직
사이의 상관 관계 연구

Correlation between Local Deformation Distribution and
Microstructure of Duplex Low-density Steel

2017년 1월

서울대학교 대학원

재료공학부

김 동 욱

듀플렉스 저비중강의 국소 변형 분포와 미세조직
사이의 상관 관계 연구

Correlation between Local Deformation Distribution and
Microstructure of Duplex Low-density Steel

지도교수 한 홍 남

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2017 년 1 월

서울대학교 대학원

재료공학부

김 동 욱

김동욱의 석사학위논문을 인준함

2016 년 12 월

위 원 장 선 정 윤 (인)

부 위 원 장 한 홍 남 (인)

위 원 박 성 준 (인)

논 문 초 록

1. 국문요약(국문초록)

본 연구에서는 DIC 기법을 이용하여 오스테나이트와 페라이트의 두 개의 상으로 구성된 듀플렉스 저비중강의 미세 변형 거동을 분석하였다. 이를 위해 DIC 기법을 SEM 및 EBSD와 접목하여 미시 규모에서 분석이 가능하도록 하는 일련의 프로그램을 작성하였으며 이를 이용하여 변형률을 획득해 EBSD 데이터와 픽셀별 1:1 비교를 수행하였다. 기계적 물성을 고려한 상별 미세 변형 분석 파트에서는 최대 전단 변형이 집중되는 영역은 결정립 단위와 일치하지 않는다는 사실을 관찰하였으며 이는 방위의 변형 안정성 이전에 결정립의 형태와 배치 등 구조적인 요소가 미세 변형에 우선적으로 영향을 미치기 때문으로 파악된다. 두 번째, 결정 방위 예측을 통한 계측 변형률 검증 파트에서는 변형이 진행될수록 방위 차이는 커지며 특정 영역에서 그 차이가 두드러지게 발생하는 경향을 보임을 확인하였으며 이것은 근본적으로는 3차원 변형을 분석하지 못하는 2차원 DIC 분석의 한계점이 원인인 것으로 파악하였다. 세 번째, 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰 파트에서는 KAM, GROD, GOS, GAM 등 결정 방위 뒤틀림 척도와 변형률 사이에는 별다른 상관성이 존재하지 않음이 판명되었으며, 결정 방위 회전량을 도입하여 변형에 대한 결정 방위 안정성이 낮은 영역만을 선택하여 관찰하였을 때 페라이트에서 GROD와 최대 전단 변형

를 사이에서 약한 선형 상관성이 존재함을 확인하였다. 이는 페라이트가 오스테나이트보다 경도가 높으므로 늦게 변형이 시작되어 변형 적합성의 제한이 크게 감소하는 것을 원인으로 판단하였다.

주요어 : 국소 변형, DIC, 나노 압입 시험, EBSD, 듀플렉스 저비중강

학번 : 2015-20806

2. 영어초록(Abstract)

Abstract

Correlation between Local Deformation Distribution and Microstructure of Duplex Low-density Steel

Donguk Kim

Material Science and Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Recently, duplex low-density steels with the high strength-ductility balance have been desirable for automobile body to reduce weight. Duplex low-density steels exhibit multi-phase microstructure and this complex microstructure lead to inhomogeneous local deformation during forming process. Understanding the relationship between local deformation and microstructure is essential to control the mechanical properties of duplex low-density steel. In this study, an advanced DIC (Digital Image Correlation) technique, which is based on SIFT (Scale-invariant feature transform) algorithm enhanced with RSC (Regular Sparse Correspondence)

method, was developed. By using the DIC technique, it was shown that microscale local deformation was distributed in inhomogeneous way although macroscale tensile strain was uniformly applied. Correlation between local deformation distribution and microstructural factors was discussed by comparing visualized strain maps from DIC technique and microstructural data from EBSD observation. In addition, deformation gradient tensor obtained by DIC technique was used as input data to predict deformed microstructures by single crystal deformation theory. The predicted results also were compared with measured microstructural data.

Keywords : Local deformation, Digital Image Correlation,
Nanoindentation, EBSD, Duplex low-density steel

Student Number : 2015-20806

목 차

초록	ii
목차	vi
표 목록	vii
그림 목록	viii
1. 서론	1
2. 실험 설계	4
3. 프로그램 구조	10
4. 결과 및 고찰	
4.1. 기계적 물성을 고려한 상별 미세 변형 분석	26
4.2. 결정 방위 예측을 통한 계측 변형률 검증	44
4.3. 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰	49
5. 결론	71

표 목 록

Table 1. Composition of LD-steel

Table 2. Stepwise acquisition of FSD and EBSD

Table 3. Mean strain for each step

Table 4. Stepwise FWMH of tensile axis normal strain for each phase

Table 5. Stepwise FWMH of shear strain for each phase

Table 6. Stepwise mean value and standard deviation of tensile axis normal strain for each phase.

Table 7. Stepwise mean value and standard deviation of tensile axis shear strain for each phase.

Table 8. Stepwise mean value and standard deviation of maximum shear strain for each phase.

Table 9. Mean nanohardness and maximum shear stress under indenter tip

그림 목록

Figure 1. Dog-bone specimen for in-situ tensile test

Figure 2. Nanoindentation marks with EBSD phase map (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 3. Structure of program

Figure 4. SIFT algorithm

Figure 5. RSC method

Figure 6. Conventional method vs RSC method

Figure 7. (1) Effects of artificial pattern of conventional DIC, (2) No interference on EBSD of RSC method

Figure 8. Gaussian 2D filter

Figure 9. Displacement of unit cell (Blue: original, Red: deformed)

Figure 10. Tensile axis normal strain for (1) 0.5%, (2) 2%, (3) 4%, (4) 6%, Shear strain for (5) 0.5%, (6) 2%, (7) 4%, (8) 6%, Maximum shear strain for (9) 0.5%, (10) 2%, (11) 4%, (12) 6%

Figure 11. (1) phase map, (2) IPF map (TD surface, LD view)

Figure 12. IPF map of (1) undeformed state, (2) 6% strained state (TD surface, LD view)

Figure 13. Tensile axis normal strain distribution of each phase at (1) 0.5%, (2) 2%, (3) 4%, (4) 6%, Shear strain distribution at (5) 0.5%, (6) 2%, (7) 4%, (8) 6%, Maximum shear strain distribution at (9) 0.5%, (10) 2%, (11) 4%, (12) 6%. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 14. Distribution curve of 0.5% strain state and 6% strain state for (1) Tensile axis normal strain, (2) Shear strain, (3) Maximum shear strain. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 15. Stepwise mean value and standard deviation of (1) tensile axis normal strain, (2) tensile axis shear strain, (3) maximum shear strain for each phase.

Figure 16. (1) Load-Displacement curve, (2) Cumulative probability of maximum shear stress under indenter tip (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 17. Misorientation between EBSD crystal orientation and predicted crystal orientation by single crystal self-consistent model (IPF map : TD surface, LD view)

Figure 18. (1) Misorientation between EBSD crystal orientation and predicted crystal orientation at 6% strain state, (2) FSD topographical image at 6% strain state

Figure 19. Misorientation filter based on prediction of crystal orientation (Black: Misorientation $<15^{\circ}$, White: Misorientation $>15^{\circ}$)

Figure 20. (1) Maximum shear strain map, (2) KAM map, (3) GROD map at strain 6% state

Figure 21. MSS vs KAM graph of (1), (2) austenite and ferrite phases, (3), (4) austenite phase, (5), (6) ferrite phase at 6% strain state. (Black: Total area, Red: Misorientation $\geq 15^\circ$ area, Blue: Misorientation $< 15^\circ$ area)

Figure 22. MSS vs GROD graph of (1), (2) austenite and ferrite phases, (3), (4) austenite phase, (5), (6) ferrite phase (Black: Total area, Red: Misorientation $\geq 15^\circ$ area, Blue: Misorientation $< 15^\circ$ area)

Figure 23. Filtering with misorientation between original crystal orientation and deformed crystal orientation

Figure 24. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 2% strain state. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 25. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 4% strain state. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 26. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and

ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 6% strain state.

(Red: Austenite, Blue: Ferrite)

Figure 27. (1) Grain size map, (2) Grain aspect ratio map, (3) Grain orientation spread(GOS) map, (4) Grain average misorientation(GAM) map at 6% strain state

Figure 28. Mean MSS vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 29. Grain size vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 30. Standard deviation of MSS vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 31. Grain size vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 32. Grain size vs Standard deviation of MSS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 33. Grain aspect ratio vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

Figure 34. Grain aspect ratio vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

1. 서론

현대 사회의 당면 목표는 지속 가능한 성장이다. 산업 혁명기로부터 이어지는 발전 일변도적인 성장의 결과 인류는 자원 고갈과 생태계 파괴에 직면하게 되었고 유엔은 앞으로의 지속적인 번영을 위하여 에너지, 식량, 기후변화 등을 의제로 삼아 인류 공동의 목표로 선정하였다.[1] 이러한 사회 분위기 속 이산화탄소 발생 저감을 위한 구조재료의 경량화 연구가 활발히 진행되고 있으며 본 연구에서 수행한 자동차용 고강도 저비중 철강의 변형 분석 역시 이와 궤를 같이 한다.

본 연구에서는 오스테나이트와 페라이트의 두 개의 상으로 구성된 듀플렉스 저비중강을 분석 대상으로 하는데 이는 각 상의 기계적 물성이 서로 다르므로 그 변형 거동 역시 서로 다를 것으로 예상된다. 이러한 다상 재료를 구조재로써 사용하기 위해서는 외력에 대한 각 상별 변형 거동을 파악하는 것이 필수적인데 이는 일반 인장 시험이나 경도 시험으로는 불가능하다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 기존의 센티미터 수준의 거시적인 규모에서 활용되는 DIC(Digital Image Correlation, 디지털 영상 상관) 기법을 SEM 및 EBSD와 접목하여 마이크로미터 수준의 미시적인 규모에서도 변형 분석이 가능토록 하였다. DIC는 시편의 종류에 관계없이 디지털 이미지이기만 하다면 무엇이든지 분석 가능하다는 점에서 다양한 분야에서 활용되는데 Pavel Sztetik 등은 복잡한 형상의 뼈에 하중이 가해졌을 때에

변형이 집중되는 구간을 연구하는 의학 계열에서 DIC를 활용한 바 있다.[2] 또한 Stephen R. Heinz 등은 일축 하중 조건에서의 유리질 폴리머 네트워크 복합체의 변형 거동을 분석하기 위해 DIC를 사용한 바 있다.[3] 이와 같이 단순히 변형률만을 측정하는 것은 ARAMIS, VIC-2D 등 기존 상용 DIC 프로그램을 사용하는 것만으로도 가능하다.[2-6] 그러나 이러한 기존 프로그램은 변위의 추적을 위해 표면에 무작위 패턴을 형성해야 하는데 이런 경우 패턴의 영향으로 인해 해당 표면의 EBSD 측정이 불가능해진다는 단점이 있다. 일례로 Soo-Hyun Joo는 25, 50, 75, 150 Å 두께의 은 필름을 인장 시편 위에 올린 후 300°C의 온도에서 5분간 어닐링하여 표면에 23, 55, 93, 189nm 크기의 불규칙한 나노 점 패턴을 형성하여 DIC 분석을 실시하였다.[7] 이 경우 단순 변형률 분석은 가능하나 나노 점 패턴으로 인해 관찰 영역의 EBSD 측정이 불가능해 결정 방위 데이터를 얻을 수 없어 변형률과 결정 방위 정보 상호간의 분석이 불가능하다. 하지만 본 연구는 단순 변형률 분석을 넘어 EBSD 데이터와의 접목을 목표로 하고 있으므로 표면에 패턴을 형성하지 않아도 분석이 가능하도록 하기 위하여 특징점을 이미지에 균일하게 강제 분포시키는 원리의 RSC(Regular Sparce Correspond) 방법을 적용한 DIC 알고리즘을 기반으로 변형률, 변위 구배 등의 기본적인 정보는 물론 EBSD 데이터와의 비교까지 하나의 시스템 속에서 수행이 가능하도록 프로그램을 개발하였다. 이후 나노 압입 시험을 통해 각 상별 나노 경도를 확보하여 상별 변형률의 분포와의 연관성을 탐구하였다. 여기에

서는 변형 단계별 각 상의 인장 방향 수직 변형률, 전단 변형률, 최대 전단 변형률의 분포를 비교하였다. 이후 단결정 Self-consistent 모델을 이용한 결정 방위 예측을 통해 계측된 변형률을 검증하였으며 본 연구에서 진행된 2차원 DIC로 인한 오차 발생 요소를 탐구하였다. 마지막으로 결정 방위 차이와 국소 변형 사이의 상관성에 대하여 탐구하였는데, 변형률과 결정 뒤틀림 척도 사이에는 직접적인 연관성이 없음을 다시 한 번 확인함은 물론 결정 방위 회전량이라는 새로운 척도를 도입하여 분석하였다.

2. 실험 설계

본 연구에서 사용된 강재는 LD-steel이라고 명명하였으며 그 조성은 Table 1.과 같다. 이 강재를 Figure 1.의 인장 시편 형상으로 가공한 뒤 기계 연마 및 전해 연마를 하여 표면을 처리하였다. 기계 연마는 #400 · #600 · #800 · #1200 사포에서 각 2분간, $6\mu\text{m}$ · $1\mu\text{m}$ 다이아몬드 서스펜션 용액에서 각 5분간 진행하였고 전해 연마는 70% Ethanol - 20% Perchloric acid - 10% Ethylene glycol monobutyl ether 용액을 이용하여 20V에서 20초간 진행하였다.

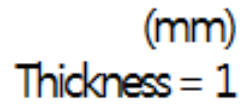
Oxford NordlysNano EBSD detector가 장착된 JEOL JSM-7001F 주사전자 현미경의 챔버 내부에 TSL-Solutions K.K. TS-2000 인장시험기를 장착하여 준비된 시편의 in-situ 인장 시험을 실시하였다. 인장 시험은 0.5% 단위로 6%까지 진행되었으며 Table 2.와 같이 매 단계마다 FSD(Forward Scatter Detection) 위상차 이미지를, 2% 단계마다 EBSD 결정 방위 데이터를 획득하였다. 결과적으로 인장 시험 중 FSD 이미지는 총 13장, EBSD 데이터는 총 4개 획득하였다. 여기에서 FSD 이미지는 2048×1536 의 최대 해상도로 얻었으며 같은 영역의 EBSD 데이터는 DIC 연계 분석시의 편의성을 위하여 $1/4$ 크기의 512×384 해상도로 얻었다. FSD 이미지를 이용하여 DIC 기법을 적용한 변형률 분석을 실시하였으며 EBSD 데이터로부터는 결정 방위, 상 정보, KAM · GROD 등 결정 방위 차이 등을 획득하여 변형률과 비교 분석

하였다.

한편 같은 강재에 대해 Hysitron TI750 나노인덴터를 이용하여 나노 경도를 측정하였다. 압입 제어는 최대 하중 5000 μ N에서 압입 5초 - 유지 2초 - 제거 5초로 설정하여 진행하였으며 5 μ m 간격의 10 \times 10 격자 형식으로 총 100회 압입을 실시하였다. 이후 Figure 2.와 같이 압입 영역에 대해 EBSD를 촬영하여 상 정보를 획득하여 각 상별로 압입 데이터를 분리하였고 압흔이 결정립계에 형성된 데이터는 제거하였다.

Composition (wt%)	C	Mn	Al	Cr	Fe
LD-steel	0.9	30	10.5	3	Bal.

Table 1. Composition of LD-steel



- 7 -

Step (%)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
FSD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EBSD	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0

Table 2. Stepwise acquisition of FSD and EBSD

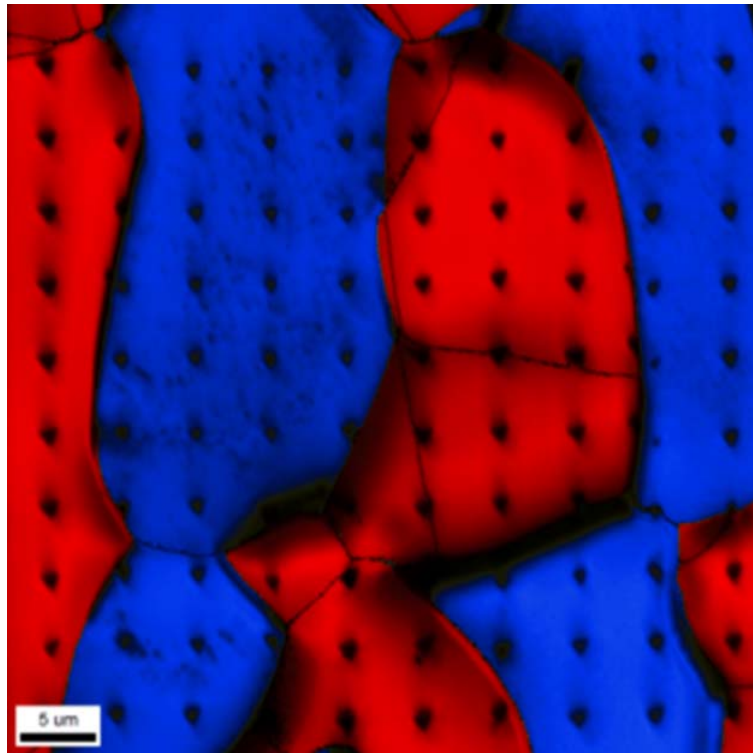


Figure 2. Nanoindentation marks with EBSD phase map
(Red: Austenite, Blue: Ferrite)

3. 프로그램 구조

3.1. 개괄

본 연구에서 개발 및 사용된 프로그램의 구조는 Figure 3.과 같다. 메인 프로그램은 DIC strain analyzer이며 연속적인 변형의 단계별 이미지를 입력하면 DIC 기법을 통해 각 이미지 사이의 변위를 측정하고 이로부터 2D Deformation gradient를 계산한 뒤 비압축성 가정을 통해 획득한 인장면의 법선 방향(이하 Z 방향) 변위를 포함해 최종적으로 3D strain tensor를 도출한다. 이로부터 인장 방향(이하 X 방향)의 변형률인 ϵ_{XX} , 인장 수직 방향(이하 Y방향)의 변형률인 ϵ_{YY} , 인장면의 전단 변형률인 ϵ_{XY} , Z 방향 변형률인 ϵ_{ZZ} 를 획득할 수 있다.

한편 본 연구에서 획득하는 변형률은 변형되기 전의 초기 단계(이하 0% 단계)에서의 위치를 기준으로 설정되어 있으므로, 변형된 단계에서의 EBSD 데이터는 0% 단계의 위치로 재배치시켜야 변형률 데이터와 1:1 비교가 가능하다. 이는 EBSD registrator가 수행하며 변형된 단계에서의 EBSD 데이터와 연속적인 변형의 단계별 이미지를 입력하면 DIC 기법을 통해 변형 후부터 변형 전까지의 역방향으로 매 단계별 변위를 측정하여 EBSD 데이터의 모든 포인트는 0% 단계의 위치로 재배치된다.

또한 Single crystal deformation calculator는 DIC strain analyzer를 통해 획득한 Strain tensor를 검증하기 위해 개발된 프로그램으로, 단결정의 변

형 거동을 기술하는 Single crystal self-consistent 모델을 기반으로 하여 결정 방위의 변화를 계산한다. 여기에서 모든 픽셀을 단결정으로 가정하였으며, DIC strain analyzer를 통해 획득한 각 픽셀의 deformation gradient이 입력값으로 이용되어 각 픽셀별로 변화된 결정 방위가 계산되어 EBSD 데이터와 동일한 형태로 출력되어 EBSD 분석 프로그램에서 활용할 수 있게 된다.

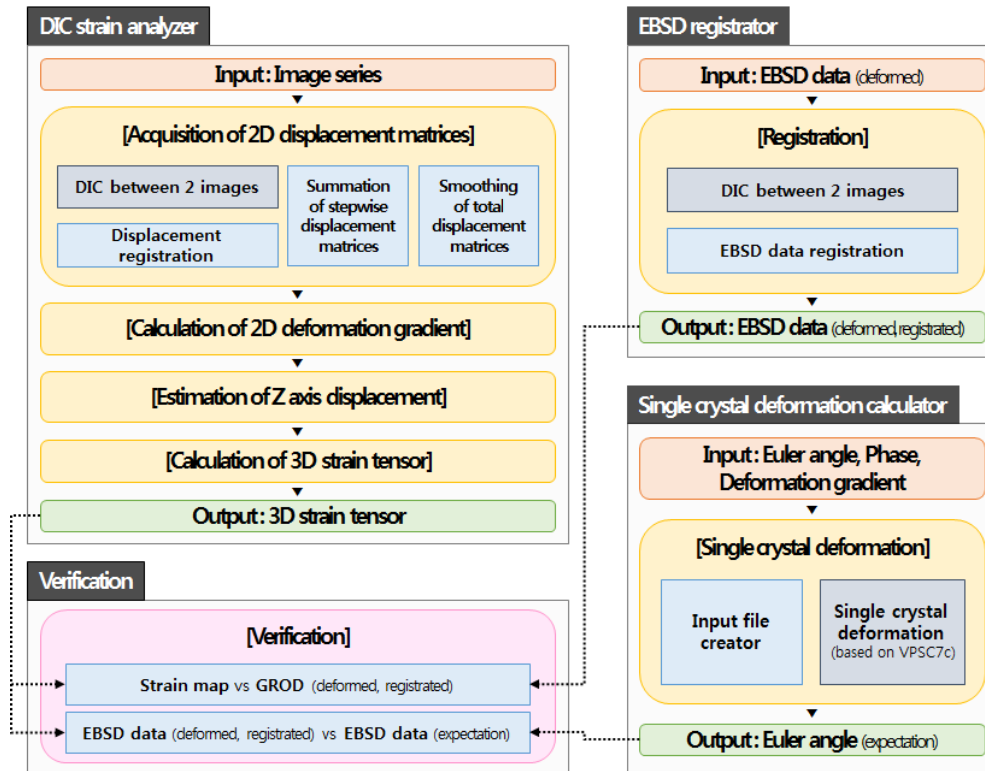


Figure 3. Structure of program

3.2. DIC 기법

본 연구에서 사용된 DIC 기법은 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) 알고리즘을 기반으로 하고 있다. SIFT는 Figure 4.와 같이 기준 이미지에서 특징점을 다수 추출한 뒤 목표 이미지에서 기준 이미지의 특징점과 가장 유사한 픽셀을 찾아 연결하는 방식이다. 여기에서는 사용되는 특징점은 이미지의 크기와 방향에 강건하도록 설계되어 분석의 정확도가 높다는 장점이 있다.[8] 그러나 특징점의 수가 적은 경우 특징점 사이의 보간이 부정확해지며, 서로 유사한 특징점이 다수 존재하는 경우에는 특징점간 오인식이 발생하여 정확도가 감소한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 SIFT 알고리즘에 추가로 RSC(Regular Sparse Correspond) 방법을 도입하였다. 이미지에 따라 특징점의 개수가 변동하는 일반 SIFT와 달리 RSC는 Figure 5.와 같이 균일하게 분포된 특징점을 기준 이미지에 강제적으로 배당하는 형식이다. 이를 통해 특징점의 수가 충분히 확보될 수 있으며 보간이 필요한 특징점 사이 거리 역시 감소하여 정확도가 상승하게 된다.

기준 이미지의 특징점과 목표 이미지의 픽셀 사이의 유사성을 판단하는 것은 Cost function의 최적화 과정을 통해 수행한다. 본 프로그램에서 사용한 Cost function은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E(mv) = & \sum_{p \in P} V_p(mv(p)) + \sum_{p \in P} \sum_{q \sim p} R_{p,q}(mv(p), mv(q)) \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{q \sim p} T_{p,q}(mv(p), mv(q)) \\
& \dots \quad (1)
\end{aligned}$$

위 식에서 P 는 기준 이미지의 특징점 집합, Q 는 목표 이미지의 특징점에 해당하는 픽셀의 집합이며 p 는 P 에 속하는 특징점, q 는 Q 에 속하는 픽셀을 의미하며 $mv(p)$ 는 점 p 의 변위 벡터이다. V_p 는 데이터 상수, $\sum_{p \in P} V_p(mv(p))$ 는 데이터 항이며 여기에서는 두 점이 속하는 국소 지역 사이의 유사성을 판단한다. $R_{p,q}$ 는 평탄성(Smoothness) 상수, $\sum_{p \in P} \sum_{q \sim p} R_{p,q}(mv(p), mv(q))$ 는 평탄성 항이며 주변부와 비교한 특징점의 $mv(p)$ 의 평탄성을 판단한다. $T_{p,q}$ 는 위상(Topology) 상수, $\sum_{p \in P} \sum_{q \sim p} T_{p,q}(mv(p), mv(q))$ 는 위상 항이며 재배치시킨 특징점과 그 주변의 픽셀간의 순서가 달라진 정도를 판단하여 기존 SIFT 알고리즘에서 서로 유사한 특징점이 다수 존재하는 경우에 정확도가 감소하는 문제를 해결하기 위하여 도입하였으며 Figure 6.과 같이 결과가 개선된다. 이러한 원리로 각 특징점마다 Cost function의 최적화를 실시하여 변위를 계산하고 특징점 사이의 보간을 실시하여 최종적으로는 이미지에 존재하는 모든 픽셀의 변위

를 획득한다.

한편 기존 DIC는 특징점을 획득하기 위하여 표면에 스프레이나 나노 입자를 도포하는 등의 방법으로 표면에 패턴을 형성하여야 한다. 그러나 이런 방법을 취할 경우 DIC 이외의 표면 분석은 실시가 불가능하고 Figure 7.(1)과 같이 EBSD를 촬영하는 경우 패턴에 해당하는 영역은 인식이 되지 않아 활용성이 크게 떨어진다. 그러나 본 연구에서의 RSC 방법을 도입하는 경우 재료의 자체적인 표면 패턴만으로도 분석이 가능하므로 별도의 전처리를 할 필요가 없고 Figure 7.(2)와 같이 DIC 분석 영역에 대해 손상 없는 EBSD 데이터를 획득하는 것이 가능하여 활용의 폭이 넓다.

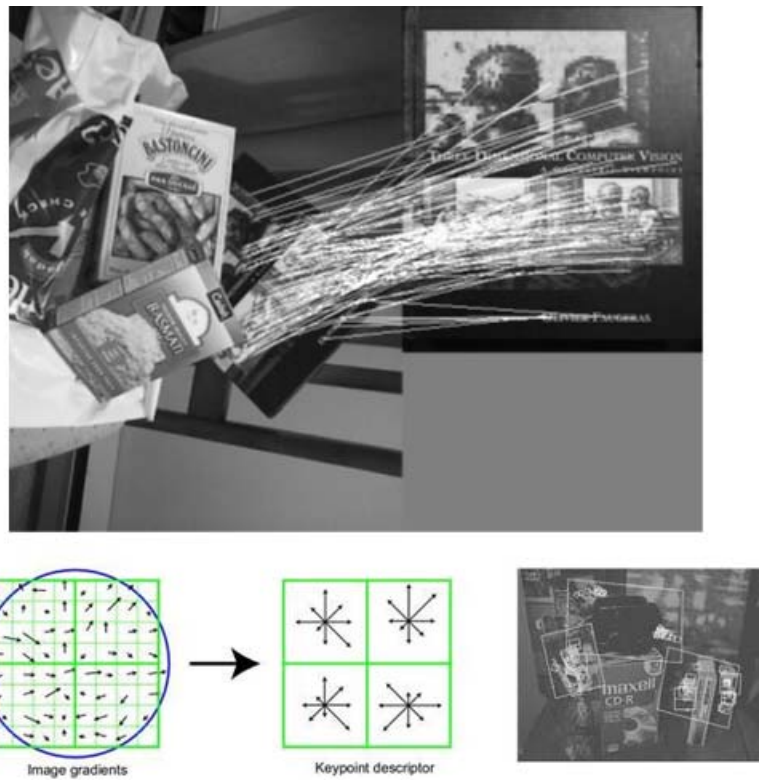


Figure 4. SIFT algorithm [9]

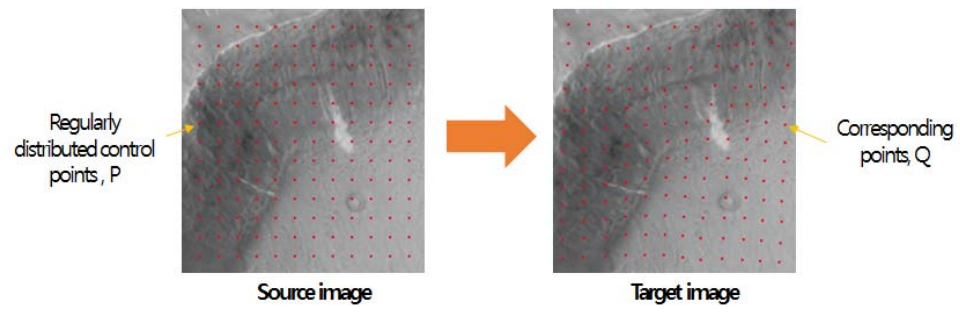


Figure 5. RSC method

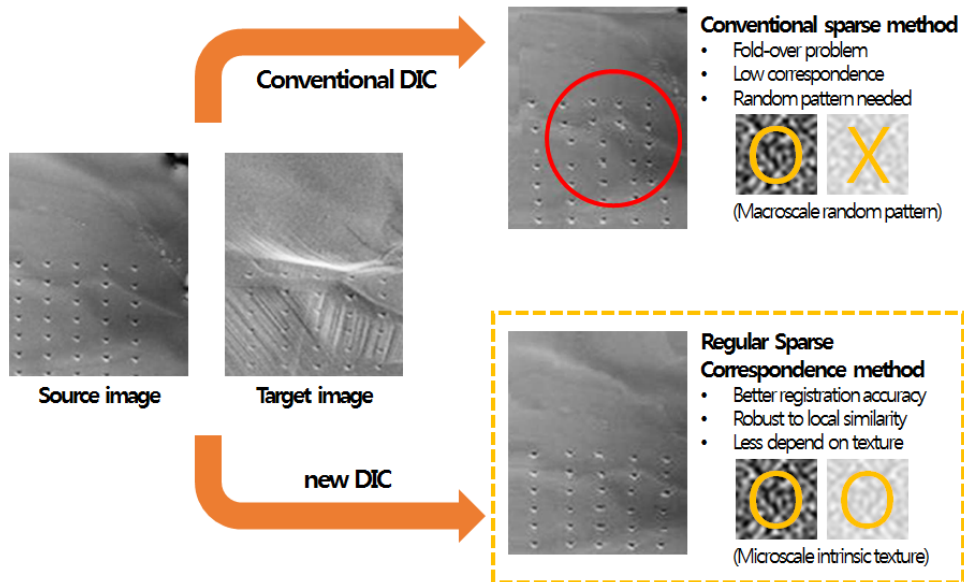


Figure 6. Conventional method vs RSC method

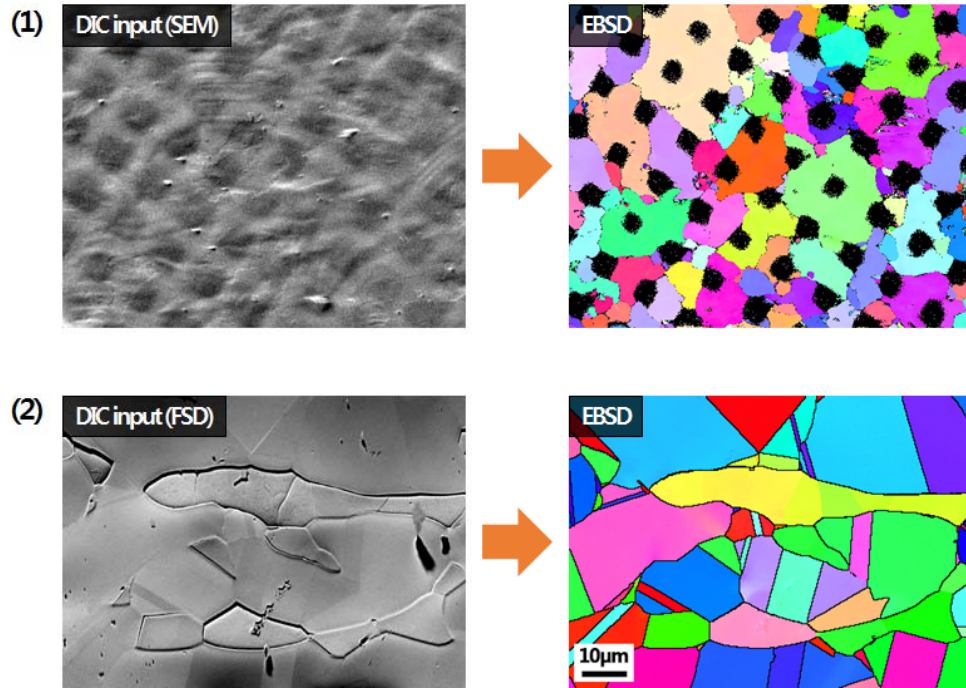


Figure 7. (1) Effects of artificial pattern of conventional DIC, (2) No interference on EBSD of RSC method

3.3. 변형률 계산

DIC를 이용하여 획득한 변위 지도는 변형 전 이미지의 각 픽셀이 기준으로 설정되어 있으며 X 방향 지도(dX)와 Y 방향 지도(dY)의 두 개로 이루어진다. 변위 지도는 디지털 이미지의 한계로 인하여 노이즈가 발생하므로 Figure 8.과 같이 가우시안 2D 필터를 적용하여 노이즈를 감소시킨다. 변위 지도의 해상도는 512*384px이며 가우시안 2D 필터의 크기는 31*31px, σ 는 5이며 가우시안 2D 필터는 다음과 같이 적용된다.

$$\frac{g(x,y)=1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \dots (2)$$

변위 지도의 한 픽셀을 기준으로 Figure 9.와 같이 그것을 둘러싸고 있는 8개의 픽셀을 변형률 계산에 사용한다. 변형률을 얻기 위하여 변위 지도로부터 우선 변형 구배 텐서(Deformation gradient tensor)를 획득하여야 하며 이는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_{XX} & F_{XY} & F_{XZ} \\ F_{YX} & F_{YY} & F_{YZ} \\ F_{ZX} & F_{ZY} & F_{ZZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{bmatrix} \dots (3)$$

(X: 변형 전 배치, x: 변형 후 배치)

DIC 분석은 X 방향과 Y 방향의 2차원으로 수행되었으므로 이로부터는 다음의 값을 얻을 수 있으며 이는 Figure 9.의 O점을 기준으로 한다.[10]

$$F_{XX} = \frac{\overline{D'E'_X}}{\overline{DE_X}} = \frac{dX_E - dX_D + 2}{2} = \frac{dX_E - dX_D}{2} + 1 \quad \dots (4)$$

$$F_{YY} = \frac{\overline{B'G'_Y}}{\overline{BG_Y}} = \frac{dY_B - dY_G + 2}{2} = \frac{dY_B - dY_G}{2} + 1 \quad \dots (5)$$

$$F_{XY} = \frac{\overline{B'G'_X}}{\overline{BG_X}} = \frac{dX_B - dX_G}{2} = \frac{dX_B - dX_G}{2} \quad \dots (6)$$

$$F_{YX} = \frac{\overline{D'E'_Y}}{\overline{DE_Y}} = \frac{dY_E - dY_D}{2} = \frac{dY_E - dY_D}{2} \quad \dots (7)$$

이후 매 픽셀의 단위 격자가 비압축성을 가진다고 고려한 $\text{def}(F) = 1$ 조건[11-13] 및 Z 방향의 전단 변형률은 없다고 가정하여 F_{ZZ} 를 계산하여 3D 변형 구배 텐서를 획득한다. 이 변형 구배 텐서를 회전 행렬(Rotation matrix)와 신장 텐서(Stretch tensor)로 극분해(Polar decomposition)하면 다음과 같다.

$$F = R \cdot U \quad \dots (8)$$

이로부터 회전이 고려된 변형률 텐서는 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = U - I \dots (9)$$

(I : 3×3 항등 행렬)

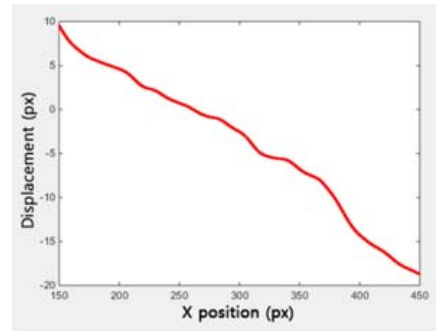
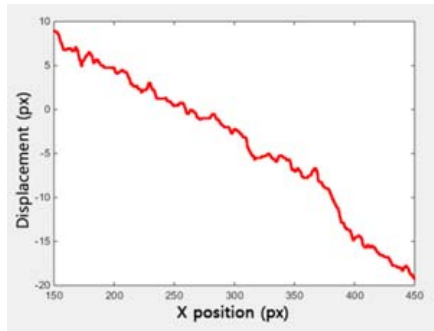
획득한 변형률 텐서로부터 X 방향 변형률 ϵ_{XX} , Y 방향 변형률 ϵ_{YY} , Z 방향 변형률 ϵ_{ZZ} , 전단 변형률 ϵ_{XY} 가 계산 가능하다.[14, 15] 또한 이로부터 최대 전단 변형률(Maximum shear strain, MSS)은 다음과 같이 계산된다.

$$MSS_{XY} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{XX} - \epsilon_{YY}}{2}\right)^2 + \epsilon_{XY}^2} \dots (10)$$

$$MSS_{YZ} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{YY} - \epsilon_{ZZ}}{2}\right)^2 + \epsilon_{YZ}^2} \dots (11)$$

$$MSS_{ZX} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{ZZ} - \epsilon_{XX}}{2}\right)^2 + \epsilon_{ZX}^2} \dots (12)$$

$$MSS = \max(MSS_{XY}, MSS_{YZ}, MSS_{ZX}) \dots (13)$$



Gaussian 2D filter

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$
 Size: 31*31px / σ : 5

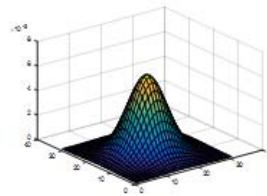


Figure 8. Gaussian 2D filter

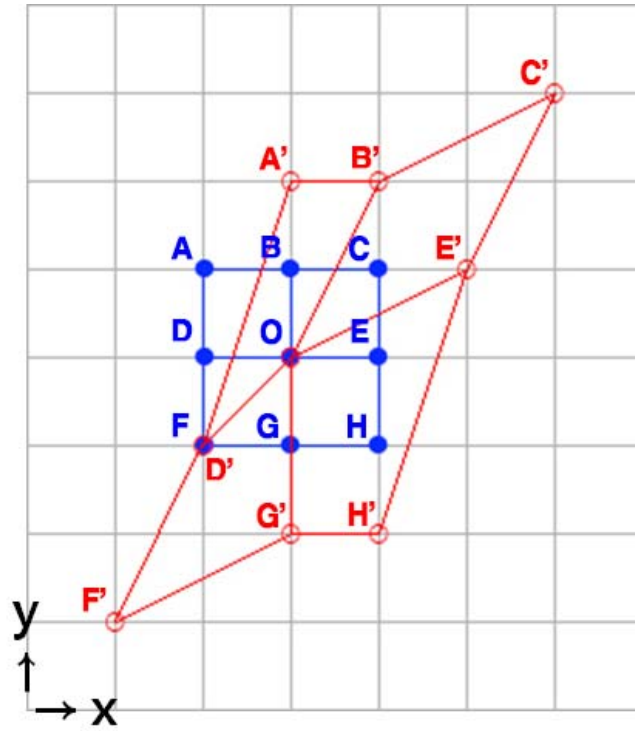


Figure 9. Displacement of unit cell (Blue: original, Red: deformed)

3.4. EBSD 데이터 재배치

본 연구에서 획득하는 변형률 데이터는 변형 전의 이미지(이하 기준 이미지)의 좌표를 기준으로 한다. 그러나 단계적으로 인장이 가해지며 획득하는 EBSD 데이터는 인장 방향으로 변형된 형상을 기준으로 하여 단계별로 좌표의 기준이 다르다. 따라서 기존에는 변형 후의 EBSD 데이터를 변형 전을 기준으로 하는 변형률 및 변형 전의 EBSD 데이터와 직접 비교하는 것이 불가능하였다. 이 점을 극복하기 위하여 DIC를 이용해 변형 후의 EBSD 데이터를 기준 이미지의 좌표에 맞도록 재배치시키는 코드를 개발하였다. 이 코드에서는 변형 후의 EBSD 데이터에 해당하는 이미지로부터 기준 이미지까지 역방향으로 X 및 Y 방향 변위를 추적한다. 획득한 변위 정보를 토대로 기준 이미지의 각 픽셀에 해당하는 변형 후 EBSD 데이터 픽셀을 찾아 그 값을 기준 이미지의 좌표에 입력하면 EBSD 데이터가 재배치된다. 이상의 내용을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$R(x,y) = D(x-dx, y-dy) \dots (14)$$

$(R(x,y))$: 기준 이미지의 좌표로 재배치된 변형 후 EBSD 데이터

$D(x,y)$: 변형 후 EBSD 데이터

dx, dy : X 및 Y 방향 변위)

4. 결과 및 고찰

4.1. 기계적 물성을 고려한 상별 미세 변형 분석

변형률 단계 0.5%, 2%, 4%, 6%마다의 DIC 측정 평균 변형률을 Table 3.에, 미세 변형률 지도를 Figure 10.에 나타내었으며 해당 영역의 상 지도와 IPF 지도를 Figure 11.에 나타내었다.

Table 3.으로부터 관찰 영역의 평균 X 방향 변형률은 거시 변형률에 비해 다소 높게 측정된 것을 확인할 수 있으며 평균 전단 변형률은 거의 0에 근접한 값을 보였다. 또한 인장 시험이 진행되며 최대 전단 변형률은 증가하는 경향을 보임을 확인하였다.

Figure 10.으로부터 인장 단계별 미세 변형의 양상을 관찰할 수 있다. Figure 11.의 상 지도를 참고하여 보았을 때 상 경계부 등 기존에 변형이 집중될 것이라고 예측되는 구간에서는 별다른 변형 집중이 관찰되지 않았다. 또한 Figure 11.의 IPF 지도를 참고하여 보았을 때 최대 전단 변형이 집중되는 영역은 결정립 단위와 일치하지 않는다. 다시 말하자면 같은 방위 관계를 가진 하나의 결정립 내부에서도 쉽게 변형되는 영역과 그렇지 않은 영역이 공존한다는 것이며 이는 방위의 변형 안정성 이전에 결정립의 형태와 배치 등 구조적인 요소가 미세 변형에 우선적으로 영향을 미침을 나타낸다. Figure 12.의 변형 전과 6% 변형 후의 IPF 지도를 비교하여 보았

을 때 변형 후 하나의 결정립 내부에서도 결정 방위의 구배가 생기는 것으로부터 마찬가지로 결정 방위의 변형 안정성보다는 결정립의 구조적인 요소가 미세 변형에 더 큰 영향을 미친다는 것을 한 번 더 확인할 수 있다.

변형률의 각 단계마다의 각 상별 변형률 분포는 Figure 13.에 나타내었다. 이것들은 Figure 14.에서 0.5% 단계와 6% 단계를 하나의 그래프에 나타냄으로서 대조되었다. X 방향 변형률과 전단 변형률은 가우시안 분포(Gaussian distribution)를, 최대 전단 변형률은 극치 분포(Extreme distribution)를 보인다. Table 4.와 Table 5.는 단계별 각각 X 방향 변형률과 전단 변형률의 상별 반치전폭(Full Width at Half Maximum, FWHM) 및 그 차이를 나타낸다.

X 방향 변형률, 전단 변형률, 최대 전단 변형률 모두 변형 초기인 0.5% 단계에서 페라이트의 피크가 오스테나이트의 피크보다 좁고 높은 양상을 보였으며 변형이 진행될수록 두 피크의 차이는 감소한다. 이는 변형 초기에는 페라이트보다 오스테나이트의 변형이 더욱 불균등하게 진행되지만 인장 시험이 진행되며 두 상 사이의 변형 불균등도 차이는 감소함을 의미한다. 한편 X 방향 변형률과 전단 변형률은 두 피크의 중심이 매 단계에서 거의 동일한 위치에 존재한다. 이는 두 상의 평균 변형률이 단계별로 큰 차이가 없음을 의미한다.

이러한 사실은 각 단계마다의 상별 변형률의 평균 및 표준편차를 나타낸 Figure 15. 및 Table 6.~9.에서도 확인된다. X 방향 변형률, 전단 변형률,

최대 전단 변형률 모두 각 단계마다의 변형률의 평균값은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 모든 단계에서 X 방향 변형률, 전단 변형률의 표준편차는 오스테나이트가 페라이트보다 큰 양상을 보였으며 특히 변형 초기의 0.5% 인장 단계에서는 두 상 사이의 표준편차 차이가 크나 변형이 점점 진행될수록 그 차이가 감소하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 변형이 진행될수록 두 상 사이의 변형 불균등도 차이가 감소함을 뜻한다. 또한 최대 전단 변형률의 경우 두 상 사이의 차이가 크지 않다는 점으로부터 인장면으로는 각 상별로 불균등하게 변형된다 하더라도 인장 시편 전체적으로는 변형이 균등하게 이루어진다는 점을 확인할 수 있다.

이상의 내용을 종합하자면 페라이트와 오스테나이트 모두 평균적으로는 변형률에 차이가 없으나 변형의 초기 단계에서 페라이트보다 오스테나이트가 더욱 불균등하게 변형된다는 것이다. H. Ghadbeigi 등의, 물성 차이가 더욱 확연한 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 강종에 대한 선행 연구의 경우에는 변형의 양상은 유사하였으나 평균 변형률이 달랐는데[16] 본 연구에서는 이와는 다른 양상을 보였다.

Figure 16.은 나노 압입 시험을 통해 획득한 상별 하중-변위 곡선 및 압입으로 인한 최대 전단 응력 그래프를, Table 9.는 상별 평균 나노 경도 및 최대 전단 응력을 나타낸다. 여기에서 최대 전단 응력은 하중-변위 곡선이 탄성 접촉을 기술하는 Hertz 곡선으로부터 벗어나는 점, 즉 소성 변형이 시작되는 점을 기준으로 계산되었으며 Hertz 곡선 및 나노 압입자의 팁을

구형으로 가정한 상태에서의 최대 전단 응력의 계산식은 다음과 같다.[17]

$$P = \frac{4}{3} E_r \sqrt{Rh^3} \quad \dots (15)$$

$$\tau_m = 0.31 \left(\frac{6PE_r^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad \dots (16)$$

(P : 하중, E_r : 환산 탄성 모듈러스(Reduced elastic modulus), R : 압입자의 반경, h : 압입 깊이, τ_m : 나노 압입시의 최대 전단 응력)

나노 경도로부터는 변형에 대한 저항성의 정도를, 최대 전단 응력으로부터는 소성 변형의 시작점을 알 수 있다. 나노 압입 시험 결과 나노 경도와 최대 전단 응력 모두 페라이트가 오스테나이트보다 높은 수치를 보였다. 즉 페라이트 상이 오스테나이트 상보다 변형 저항성이 크며 소성 변형 역시 늦게 시작된다. 이는 위에서 언급한 상 간 불균등 변형과 상통하는데, 변형 초기의 0.5% 단계에서는 오스테나이트에 변형이 집중되어 페라이트보다 넓은 피크를 보이며, 두 상 사이의 나노 경도 차이가 0.33GPa 정도로 크지는 않으므로 변형이 진행됨에 따라 상 간 변형의 불균등도는 감소하는 것으로 해석이 가능하다.

	ϵ_{xx}	ϵ_{xy}	MSS
0.5%	0.01	-0.01	0.03
2%	0.03	-0.01	0.06
4%	0.05	0.00	0.09
6%	0.08	0.00	0.13

Table 3. Mean strain for each step

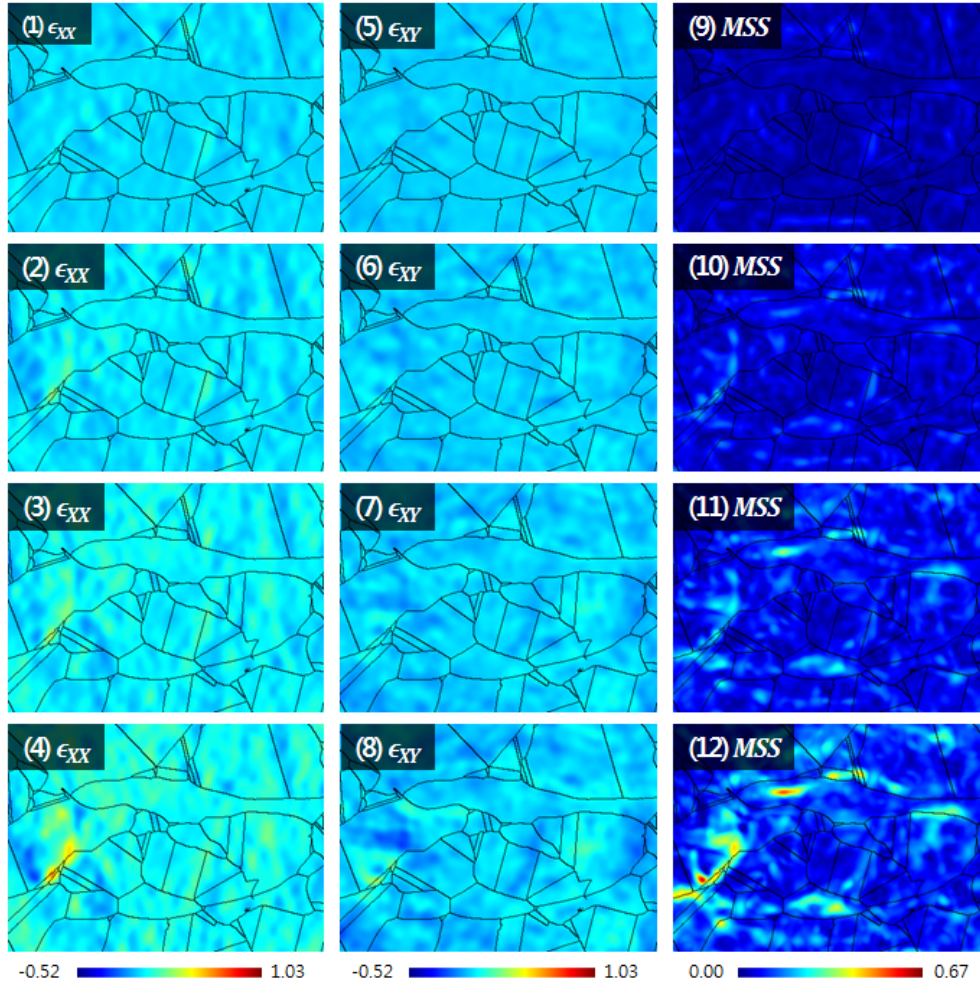


Figure 10. Tensile axis normal strain for (1) 0.5%, (2) 2%, (3) 4%, (4) 6%, Shear strain for (5) 0.5%, (6) 2%, (7) 4%, (8) 6%, Maximum shear strain for (9) 0.5%, (10) 2%, (11) 4%, (12) 6%

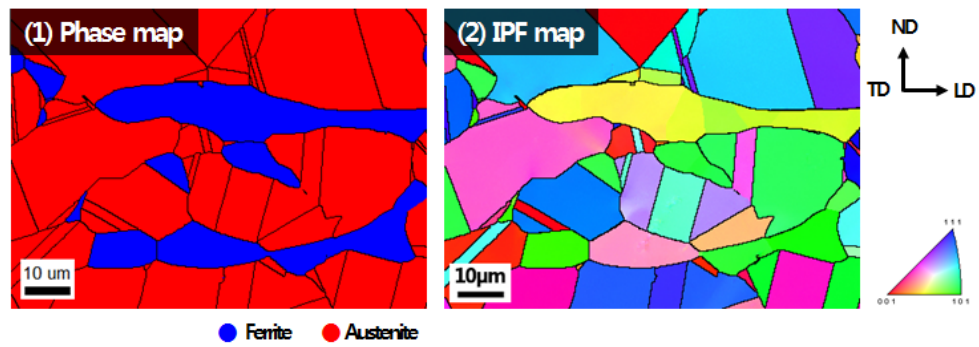


Figure 11. (1) phase map, (2) IPF map (TD surface, LD view)

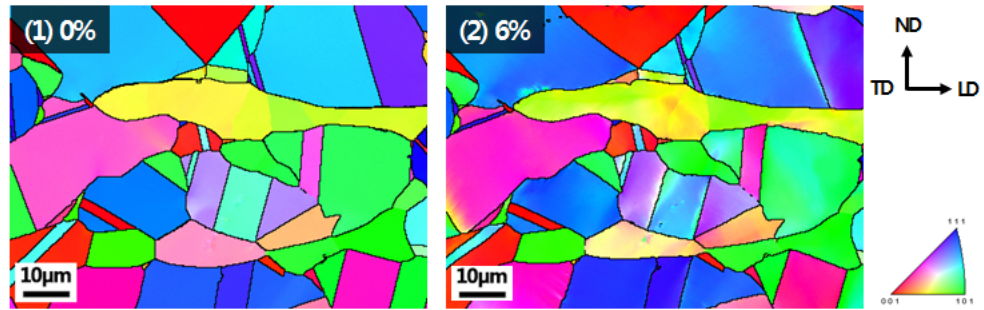


Figure 12. IPF map of (1) undeformed state, (2) 6% strained state (TD surface, LD view)

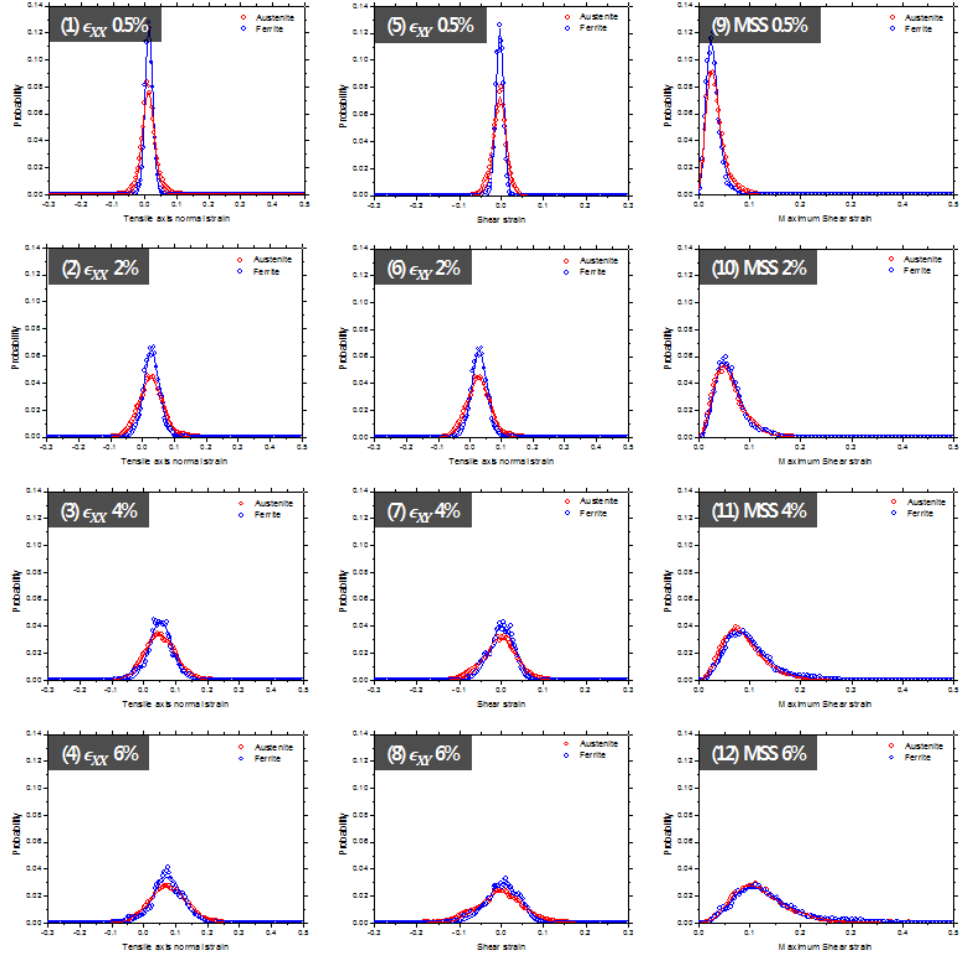


Figure 13. Tensile axis normal strain distribution of each phase at (1) 0.5%, (2) 2%, (3) 4%, (4) 6%, Shear strain distribution at (5) 0.5%, (6) 2%, (7) 4%, (8) 6%, Maximum shear strain distribution at (9) 0.5%, (10) 2%, (11) 4%, (12) 6%. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

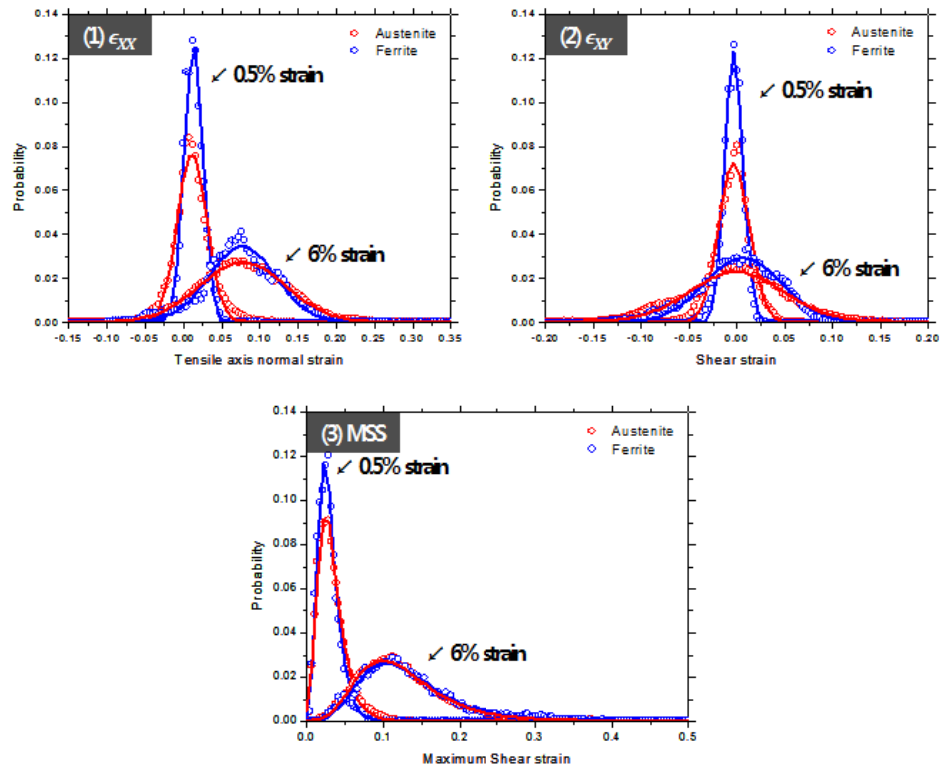


Figure 14. Distribution curve of 0.5% strain state and 6% strain state for (1) Tensile axis normal strain, (2) Shear strain, (3) Maximum shear strain. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

	0.5%	2%	4%	6%
Austenite	0.029	0.055	0.081	0.103
Ferrite	0.045	0.083	0.111	0.134
Difference	55.2%	50.9%	37.0%	30.1%

Table 4. Stepwise FWHM of tensile axis normal strain for each phase

	0.5%	2%	4%	6%
Austenite	0.037	0.064	0.087	0.117
Ferrite	0.022	0.043	0.071	0.094
Difference	68.2%	48.8%	22.5%	24.5%

Table 5. Stepwise FWMH of shear strain for each phase

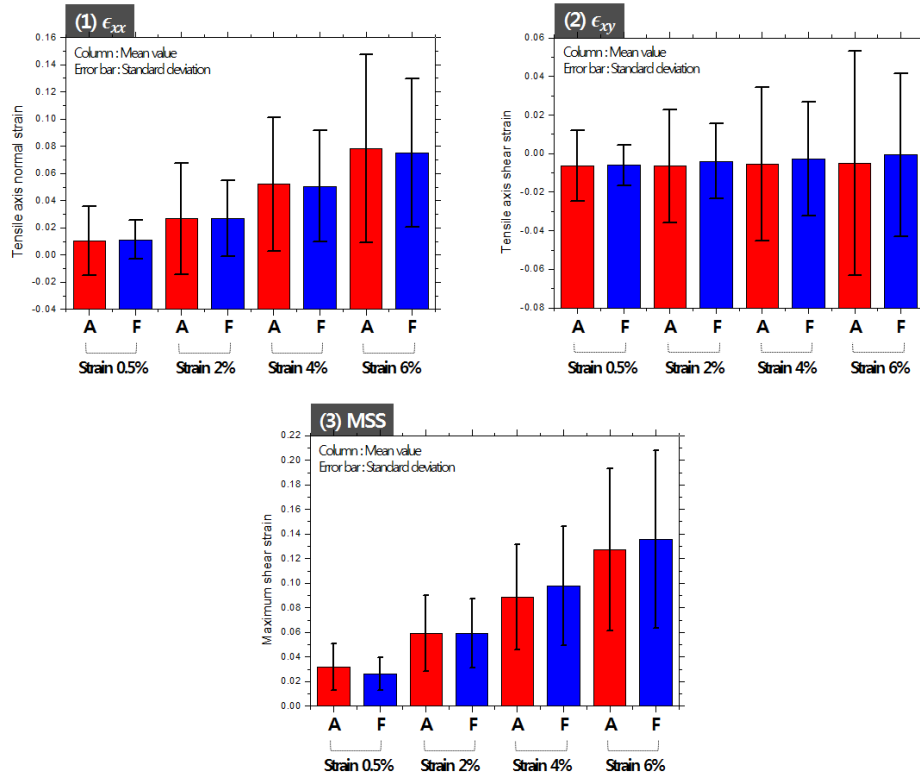


Figure 15. Stepwise mean value and standard deviation of (1) tensile axis normal strain, (2) tensile axis shear strain, (3) maximum shear strain for each phase.

	Mean value (Standard deviation)			
	0.5%	2%	4%	6%
Austenite	0.010 (0.025)	0.027 (0.041)	0.052 (0.049)	0.078 (0.069)
Ferrite	0.011 (0.014)	0.027 (0.028)	0.050 (0.041)	0.075 (0.055)

Table 6. Stepwise mean value and standard deviation of tensile axis normal strain for each phase.

	Mean value (Standard deviation)			
	0.5%	2%	4%	6%
Austenite	-0.006 (0.018)	-0.007 (0.029)	-0.006 (0.040)	-0.005 (0.058)
Ferrite	-0.006 (0.011)	-0.004 (0.019)	-0.003 (0.030)	-0.001 (0.042)

Table 7. Stepwise mean value and standard deviation of tensile axis shear strain for each phase.

	Mean value (Standard deviation)			
	0.5%	2%	4%	6%
Austenite	0.032 (0.019)	0.059 (0.031)	0.089 (0.043)	0.127 (0.066)
Ferrite	0.026 (0.013)	0.059 (0.028)	0.098 (0.048)	0.136 (0.072)

Table 8. Stepwise mean value and standard deviation of maximum shear strain for each phase.

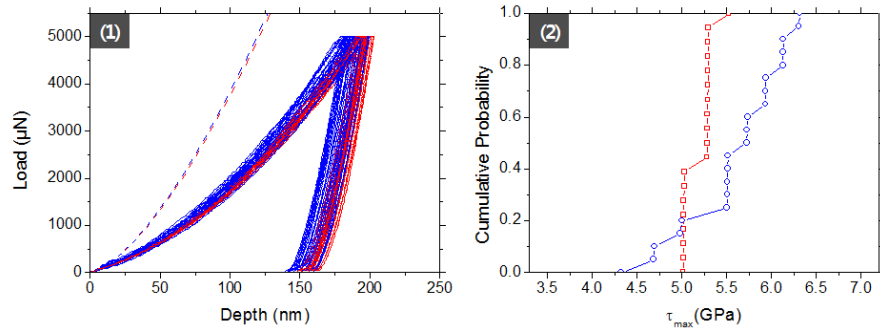


Figure 16. (1) Load-Displacement curve, (2) Cumulative probability of maximum shear stress under indenter tip (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

	Nanohardness [GPa]	τ_{\max} [GPa]
Austenite	4.33 ($\sigma=0.16$)	5.19 ($\sigma=0.15$)
Ferrite	4.66 ($\sigma=0.29$)	5.58 ($\sigma=0.56$)

Table 9. Mean nanohardness and maximum shear stress under indenter tip

4.2. 결정 방위 예측을 통한 계측 변형률 검증

DIC 기법을 통해 계산된 변형률은 기본적으로 2D 데이터를 기반으로 분석하였으며 매 픽셀의 단위 격자가 비압축성임을 가정하여 Z 방향의 변형 구배를 계산하였으므로 이로 인하여 Z 방향과 관련된 변형률에 다소간 오차가 존재할 수 있다. 이러한 오차가 주로 어떤 영역에서 발생하는지 알기 위하여 매 픽셀을 단결정으로 가정한 후 DIC를 통해 획득한 변형 구배 텐서를 입력값으로 사용하여 Self-consistent 모델을 이용해 결정 방위를 예측하였다.[18] 이후 EBSD를 통해 관찰된 실제 결정 방위와의 픽셀별 1:1 비교를 통하여 방위 차이를 계산하였다. 여기에서 변형 후 결정 방위 지도는 DIC 기법을 통해 변형 전의 위치를 기준으로 재배치되었으며, 고려된 슬립 계는 페라이트는 $\{110\}\langle 111 \rangle$, $\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{123\}\langle 111 \rangle$ 의 3개이고 오스테나이트는 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 의 1개이다. 이상의 결과는 Figure 17.에 나타내었다.

Figure 17.의 방위 차이 지도에서는 변형 초기 단계인 2%에서 전반적으로는 방위 차이가 크지 않으나 일부 맞지 않는 영역이 존재하며 변형이 4%, 6%로 진행됨에 따라 이러한 영역이 점차 확대되는 경향을 보인다. 이러한 영역은 실제 방위를 제대로 예측하지 못한 것을 나타내는데 이것은 2차원의 DIC가 가지는 한계점을 시사하기도 한다. 본 연구에서는 앞선 프로그램 구조 항목에서 언급한 바와 같이 X 방향 및 Y 방향의 변위를 획득하여 3차원 변형 구배 텐서 F 의 F_{XX} , F_{XY} , F_{YX} , F_{YY} 를 계산한다. 이후 매 픽셀을 단위 격자로 상정한 뒤 Z 방향으로의 전단 변형이 일어나지 않는

다는 가정을 통해 $F_{ZX} = F_{ZY} = F_{XZ} = F_{YZ} = 0$ 을, 단위 격자가 비압축성을 가진다는 가정을 통해 $\text{def}(F) = 1$ 로부터 F_{ZZ} 를 획득하였으며 이렇게 얻은 3차원 변형 구배 텐서를 통해 변형률을 계산하였다. 이 과정에서 3차원 변형 정보, 즉 Z 방향 변형 정보는 오로지 두 개의 가정만을 이용하여 얻어졌기 때문에 실제의 Z 방향 정보와 차이가 존재할 수 있다. 특히 이런 점은 Figure 18.과 연관지어 설명할 수 있는데, Figure 18. (1)의 6% 변형 단계에서 실제 방위와 예측 방위의 차이가 크게 나타나는 영역은 주로 Figure 18. (2)의 FSD 이미지에서 Z 방향의 변형이 두드러지게 나타났던 영역과 일치한다. 이는 Z 방향에 관한 두 가지 가정 중 Z 방향의 전단 변형은 없다는 가정이 적합하지 않은 영역이 존재함을 의미한다. 즉 이와 같은 특정 영역에서 발생하는 Z 방향의 전단 변형은 무시할 수 없을 정도이므로 2차원 DIC 분석으로는 정확한 변형을 측정할 수 없는 것으로 판단된다.

Z 방향의 전단 변형이 크게 나타난 영역 중 일부는 실제 방위와 예측 방위가 15° 이상 차이가 나기도 한다. 여기에서 15° 는 결정립을 구분하는 일반적인 방위 차이이므로 이 각도 이상 차이가 나는 영역은 방위가 전혀 다르게 예측이 된 것이고 이는 즉 입력한 변형률의 신뢰성이 매우 낮은 영역이다. 이 영역은 Figure 19.에 흰색으로 나타내었으며 면적 비율은 전체 영역의 약 1.2%에 해당한다. 이 영역은 다음 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰 항목에서 분석 예외 대상으로 지정하여 오류 최소화를 도모하였다.

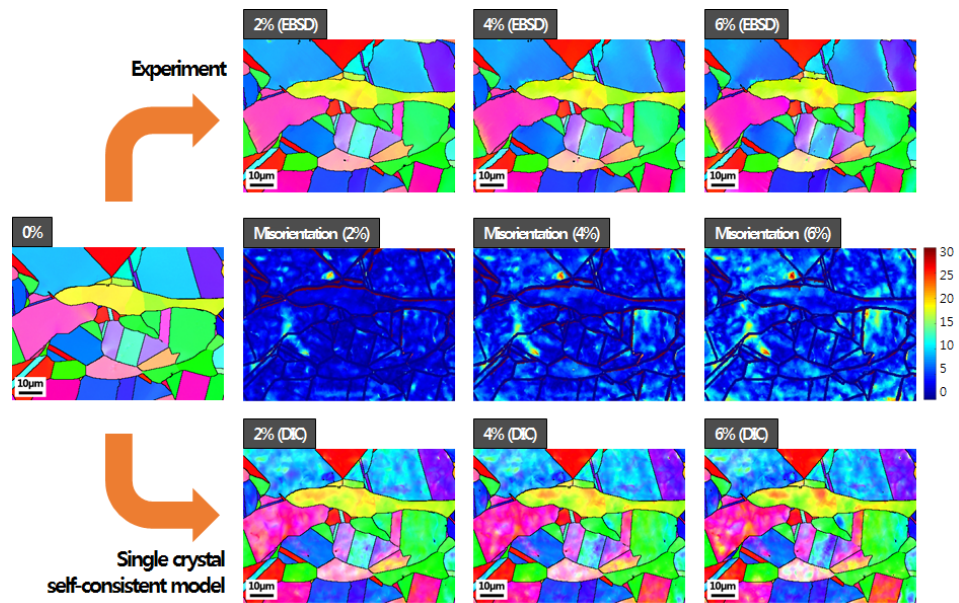


Figure 17. Misorientation between EBSD crystal orientation and predicted crystal orientation by single crystal self-consistent model (IPF map : TD surface, LD view)

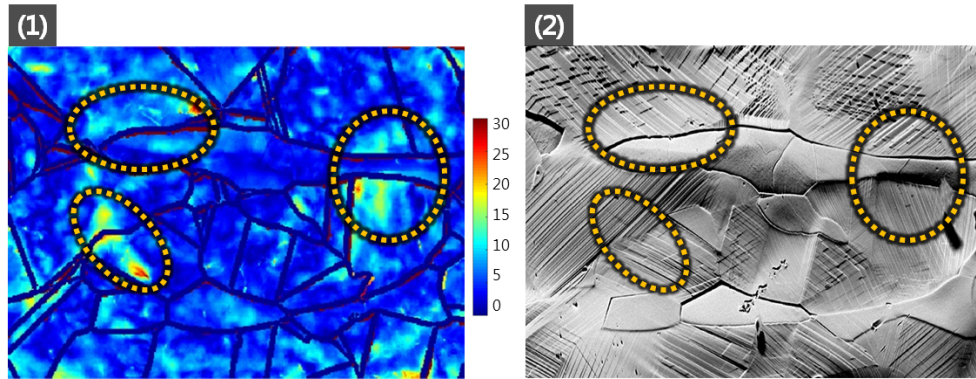


Figure 18. (1) Misorientation between EBSD crystal orientation and predicted crystal orientation at 6% strain state, (2) FSD topographical image at 6% strain state



Figure 19. Misorientation filter based on prediction of crystal orientation (Black: Misorientation $<15^{\circ}$, White: Misorientation $>15^{\circ}$)

4.3. 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰

DIC 기법을 이용해 변형률 분포를 직접적으로 획득하는 방법이 개발되기 이전에는 주로 EBSD 데이터로부터 계산되는 KAM(Kernel Average Misorientation), GROD(Grain Reference Orientation Deviation), GOS(Grain Orientation Spread), GAM(Grain Average Misorientation) 등의 요소로부터 변형률 분포를 간접적으로 파악하였다. 여기에서 KAM은 한 픽셀과 그 픽셀을 둘러싸고 있는 커널 사이의 방위 차이를 나타내는 값이며 한 픽셀이 결정립계 근방에 위치하는 경우 그 커널은 관찰 대상 픽셀이 속하는 결정립계 내부에만 설정한다. GROD는 한 픽셀의 방위와 해당 픽셀이 존재하는 결정립 전체의 평균 방위와의 차이를 나타내는 값이다. GOS는 한 픽셀의 방위와 결정립 전체의 평균 방위 사이의 차이를 해당 결정립의 모든 픽셀에 대해 계산한 후 평균을 구한 값이다. GAM은 한 픽셀의 방위와 그 주변 픽셀의 방위 차이를 해당 결정립의 모든 픽셀에 대해 계산한 후 평균을 구한 값이다. KAM, GROD, GOS, GAM 모두 한 결정립 내부에서만 계산되는 값이며 KAM과 GROD는 결정립 내부의 각 픽셀마다 서로 다른 값을 가지는 반면 GOS와 GAM은 한 결정립당 하나의 값을 가진다.

상기 언급한 바와 같이 기존에는 이러한 KAM, GROD, GOS, GAM 등 결정 방위 뒤틀림 척도로부터 변형률을 간접적으로 파악하였는데 본 실험에서는 DIC를 통한 변형률을 획득하였고 같은 영역에 대한 EBSD 데이터도 또한 가지고 있으므로 변형률과 결정 뒤틀림 척도를 직접 비교할 수 있다.

Figure 20.에는 6% 단계에서의 최대 전단 변형률 지도 및 KAM, GROD 지도가 담겨있다. KAM과 GROD는 모든 픽셀에 대해 각각 정의되는 값이므로 DIC를 통해 얻은 변형률과 직접 비교가 가능하다. 그러나 Figure 20.의 지도만으로는 별다른 연관성이 관찰되지 않는다. 따라서 매 픽셀의 최대 전단 변형률과 KAM, 최대 전단 변형률과 GROD 값을 추출하여 이를 그래프로 나타낸 것이 Figure 21., 22.이다. 여기에서 검정색은 전체 관찰 영역, 빨간색은 앞서 언급한 Figure 19.의 흰색에 해당하는 실제 방위와 예측 방위가 15° 이상 차이나는 오류 영역이며 파란색은 전체 관찰 영역에서 오류 영역을 제외한, 실제 방위와 예측 방위가 15° 미만 차이나는 영역으로 이를 분석 대상으로 삼았다. Figure 21., 22.에서는 통설과 달리 최대 전단 변형률과 KAM, 최대 전단 변형률과 GROD 사이에서는 별다른 상관관계가 관찰되지 않았다. 이는 최대 전단 변형률이 아닌 X 방향 변형률, 전단 변형률과 대응하여도 마찬가지이다. 즉 결정 방위 뒤틀림 척도로부터 변형률을 유추하는 것은 적절치 않음을 확인할 수 있다. 기존에도 이와 관련된 연구가 존재한 바 있는데 해당 연구에서는 변형률이 곧 전위(Dislocation)와 직결되지 않음을 원인으로 제시하고 있다.[2] 전단 응력이 작용하는 경우, 비교적 변형이 자유로운 결정립 내부 영역에서는 변형률이 크더라도 전위가 발생하지 않고 입자 배열이 기울어지는 기구가 작용하여 결정 방위 뒤틀림은 적게 발생할 수 있는 반면 비교적 변형이 제한된 결정립계 영역에서는 변형률이 작더라도 변형 적합성(Deformation

compatibility)을 유지하기 위하여 전위가 발생하여 결정 방위 뒤틀림이 크게 발생한다는 것이다.[2] 또한 변형률은 변형의 과정을 모두 고려하여 결정립계와 관계없이 전 영역에서 획득된 것임에 비해 결정 방위 뒤틀림 척도는 변형이 완료된 조직의 각 결정립 내부의 결정 방위만을 통해 획득된 값이므로 이 두 척도가 직접적으로 연결된다고 보기는 어렵다.

관찰 영역 내의 모든 점에 대해 변형률과 결정 뒤틀림 척도 사이의 연관성은 상기 언급한 바와 같이 존재하지 않는다. 그러나 변형률이 클수록 결정 방위 뒤틀림 역시 커진다는 것은 일반적인 논리로써 납득할 수 있는 것이므로 전 영역이 아닌 특정한 기준으로 선별된 일부 영역에서는 두 요소 간 연관성이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 영역 선별의 기준으로 Figure 23.와 같이 각 픽셀별 변형 전 결정 방위와 변형 후 결정 방위 사이의 차이, 즉 결정 방위 회전량을 선택하였다. 변형 후의 EBSD 데이터는 DIC 기법을 이용해 변형 전과 동일한 위치로 재배치되었으며 이를 변형 전과 1:1 비교하여 결정 방위 회전량 지도를 산출하였다. 이를 기반으로 특정 결정 방위 회전량 이상인 영역만을 선택적으로 분석하였으며 그 결과는 Figure 24.~26.에 나타내었다. 여기에서 2% 단계에서는 결정 방위 회전량 4° 이상인 영역을, 4% 단계에서는 7° 이상인 영역을, 6% 단계에서는 10° 이상인 영역을 선택하였는데 이는 2% 단계와 4% 단계는 페라이트에서 선형 연관성이 나타나는 결정 방위 회전량의 최소값을 기준으로 하였으며 6% 단계는 별도의 선형 상관성이 나타나지 않았기 때문에 2% 단계와 4% 단계의

차이 3° 만큼을 더하여 10° 로 선택하였다. Figure 24.는 2% 단계의 그래프로 GROD의 경우 오스테나이트 상에서 일부 영역에서 부분적으로 최대 전단 변형률과의 선형 상관성이, 페라이트 상은 선형 상관 계수가 0.34로 약한 선형 상관성이 관찰되었다. 4% 단계의 그래프를 나타내는 Figure 25.에서도 이와 유사한 경향이 나타났으나 페라이트 상의 선형 상관 계수가 0.12로 크게 감소하는 경향을 보였다. 6% 단계의 Figure 26.에서는 결과적으로 오스테나이트와 페라이트 모두 최대 전단 변형률과 GROD 사이의 선형 상관성이 존재하지 않는 것으로 파악되었다. 또한 2%, 4%, 6%의 모든 단계에서 최대 전단 변형률과 KAM 사이에는 아무런 상관성이 없는 것으로 파악되었다.

변형 초기 단계의 페라이트 상에서 최대 전단 변형률과 GROD 사이에 상관성이 나타나다가 변형이 진행될수록 상관성이 사라지는 것은 앞서 상별 변형률 분포 분석에서 페라이트가 오스테나이트보다 비교적 균등한 변형을 보였다는 점과 연관되어 해석이 가능하다. 변형 초기에 경도가 낮은 오스테나이트는 경도가 높은 페라이트보다 우선 변형되기 시작하였으며 변형 적합성을 유지하기 위하여 불균등하게 변형되었기 때문에 변형률이 높더라도 GROD가 적을 수 있고 그 반대의 경우도 가능하다. 즉 단결정이 아닌 다결정 구조인데다가 경도가 더욱 높은 다른 상의 존재로 인하여 변형이 곧 결정 뒤틀림으로 이어지는 것은 아니라고 할 수 있다. 반면 페라이트의 특정 결정 방위 회전량 이상에서 나타난 선형 상관성은 오스테나이트

와는 정반대로 해석이 가능하다. 페라이트는 오스테나이트보다 경도가 높으므로 오스테나이트보다 늦게 변형이 시작되어 변형 적합성의 제한이 크게 감소하므로 결정 방위의 불안정성이 높은 방위부터 선택적으로 변형을 시작할 수 있다. 선형성 판별을 위한 영역 선택 기준으로 삼은 결정 방위 회전량이 높은 영역은 곧 결정 방위의 불안정성이 높은 영역이라고 판단할 수 있으므로 해당 영역에서 변형률과 GROD 사이에서 선형 상관성이 관찰되는 것이라고 판단된다.

한편 KAM은 GROD와는 달리 두 상 모두 각 변형 단계별로 결정 방위 회전량을 기준으로 영역을 선택하여도 상관성이 관찰되지 않았는데 이는 KAM 자체가 한 픽셀의 커널만을 기반으로 계산되어 매우 국소적인 영역의 결정 방위 뒤틀림만을 나타내기 때문이다. 특히 본 연구의 EBSD 데이터는 1 픽셀이 약 $0.2\mu\text{m}$ 에 해당하고 픽셀은 정사각형으로 설정되었으므로 KAM을 계산하기 위해 사용되는 커널은 면적 $0.36\mu\text{m}^2$, 둘레 $2.4\mu\text{m}$ 로 그 크기가 매우 작기 때문에 DIC를 통해 획득하는 변형률과 직접적으로 연관되지 않는 것으로 파악된다.

GOS와 GAM은 결정립마다 하나의 값을 가지는 척도이므로 본 연구에서 획득한 변형률과는 기준 자체가 직접 비교는 불가능하다. 따라서 최대 전단 변형률 데이터를 각 결정립별로 구분한 뒤 결정립의 평균 최대 전단 변형률 및 최대 전단 변형률의 표준편차를 계산하여 비교가 가능하다. 또한 결정립 단위로 분석하는 경우에는 결정립의 크기 및 결정립의 종횡비

(Aspect ratio) 정보도 변형 해석에 유효한 변수로 활용할 수 있다. Figure 27.은 변형률 6% 단계에서의 결정립 크기, 결정립 종횡비, GOS, GAM 지도를 나타낸다. 여기에서 사용된 EBSD 데이터는 DIC를 통해 얻은 변형률과 상호 비교하기 위하여 기준 이미지에 맞추어 재배치된 것이므로 GOS와 GAM은 변형률 6% 단계의 정보에 해당하나 결정립 크기와 결정립 종횡비는 변형되지 않은 단계의 정보에 해당한다.

Figure 28.은 최대 전단 변형률의 평균값과 GAM의 분포를, Figure 29.는 결정립 크기와 GAM의 분포를 나타낸 그래프로 여기에서는 각 변수간 상관성이 전혀 드러나지 않았다. 이로부터는 한 결정립이 수용하는 평균 변형률이 크다 하더라도 이것이 GAM의 증가로 이어지지 않으며 여기에는 결정립의 크기도 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 이는 결정립이 평균적으로 크게 변형되더라도 해당 결정립이 균일하게 슬립 변형하여 결정 방위가 변하는 경우에는 GAM이 낮게 유지될 수 있다는 점, 결정립이 평균적으로는 적게 변형되더라도 일부에 변형이 집중되는 경우 해당 영역만 결정 방위가 크게 변하여 GAM이 높아질 수 있는 등의 것이 원인이다.

Figure 30.은 최대 전단 변형률의 표준편차와 GOS의 분포를 나타낸 그래프이다. 변형률 2%, 4% 단계에서는 별다른 상관성이 나타나지 않다가 6% 단계에서 선형 상관 계수 0.14 정도의 약한 상관성이 나타났다. 한편 Figure 31.은 결정립 크기와 GOS의 분포를, Figure 32.는 결정립 크기와 최대 전단 변형률의 표준편차의 분포를 나타낸 그래프이다. 여기에서 모든

변형 단계에서 결정립 크기와 GOS 사이에 그리고 결정립 크기와 최대 전단 응력의 표준편차 사이에서 약한 선형 상관성이 존재함을 확인할 수 있다. 즉 결정립의 크기가 클수록 GOS와 최대 전단 응력의 표준편차가 커지는 것이며 Figure 30.의 6% 단계 나타난 GOS와 최대 전단 응력의 표준편차 사이의 상관성은 결정립 크기를 매개로 하여 도출된 것으로 파악이 가능하다. 여기에서 결정립의 크기가 GOS 및 최대 전단 응력의 표준편차와 선형 상관성을 가지는 것은 관찰 영역이 넓으면 그 분포 역시 다양해지는 것이 근본 원인이며 별다른 물리적 의미를 가지는 것은 아닌 것으로 파악된다. 한편 Figure 33.은 결정립의 종횡비와 GAM의 분포를, Figure 34.는 결정립의 종횡비와 GOS의 분포를 나타내는 그래프이다. GAM과 GOS 모두 결정립의 종횡비와는 상관성이 없는 것으로 나타나 결정립 종횡비는 결정 방위 뒤틀림에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판명되었다.

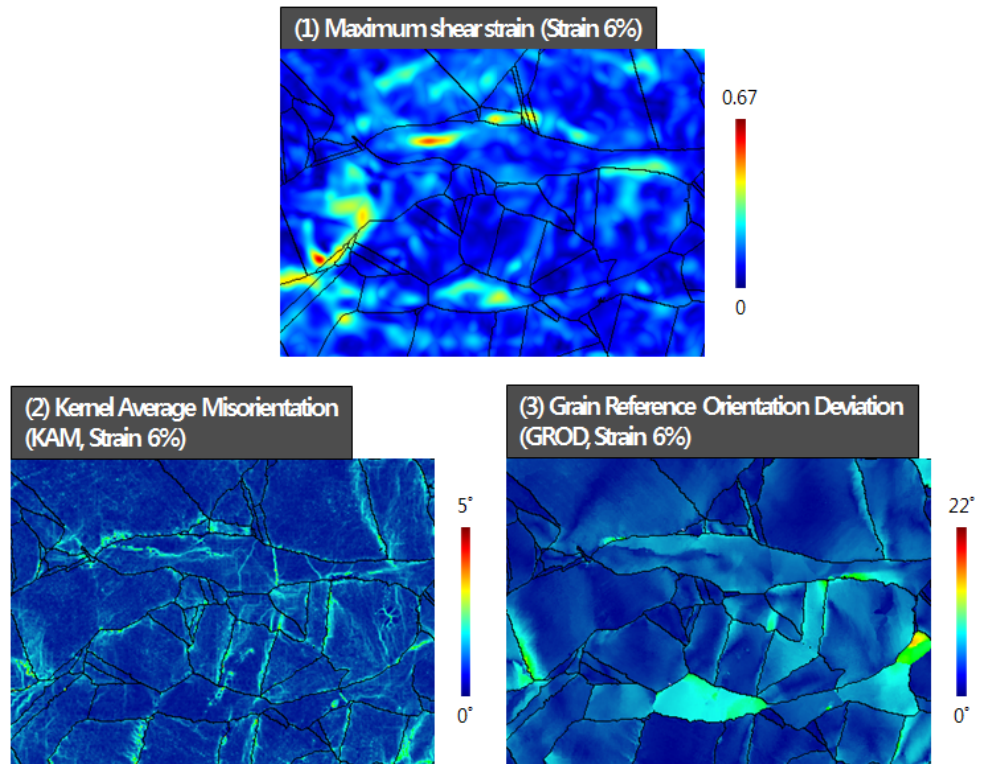


Figure 20. (1) Maximum shear strain map, (2) KAM map, (3) GROD map at strain 6% state

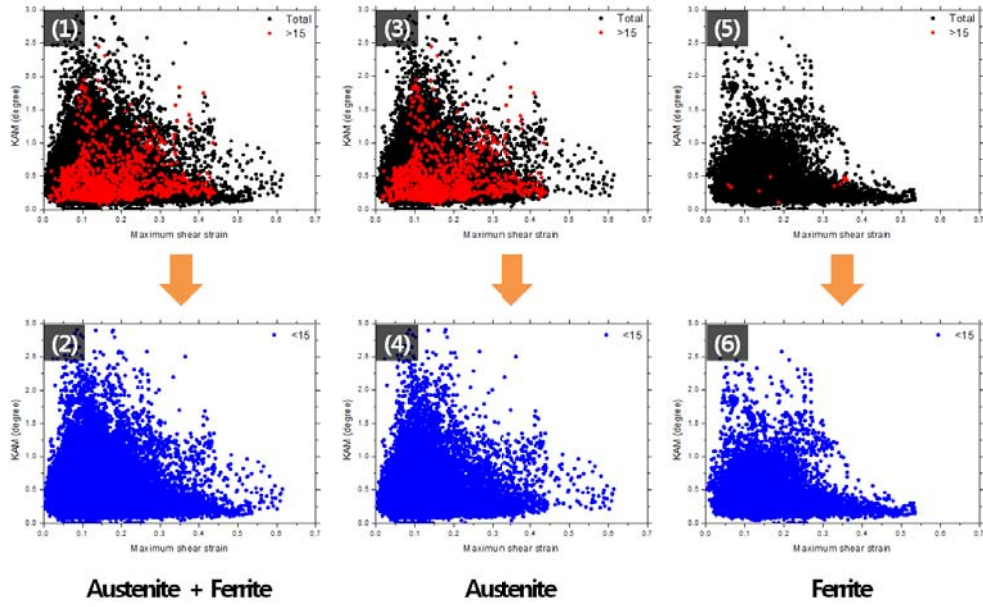


Figure 21. MSS vs KAM graph of (1), (2) austenite and ferrite phases, (3), (4) austenite phase, (5), (6) ferrite phase at 6% strain state. (Black: Total area, Red: Misorientation $\geq 15^\circ$ area, Blue: Misorientation $< 15^\circ$ area)

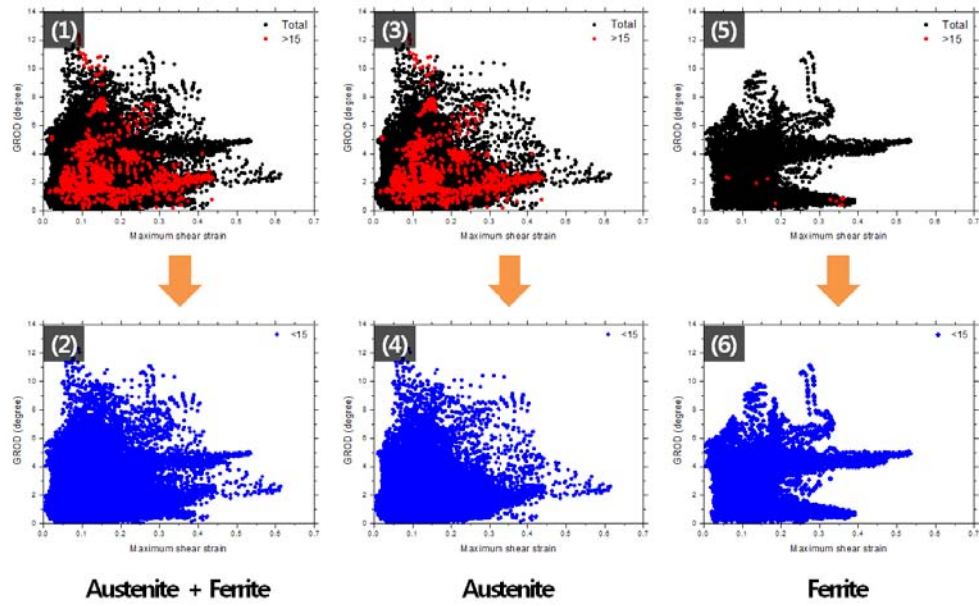


Figure 22. MSS vs GROD graph of (1), (2) austenite and ferrite phases, (3), (4) austenite phase, (5), (6) ferrite phase (Black: Total area, Red: Misorientation $\geq 15^\circ$ area, Blue: Misorientation $< 15^\circ$ area)

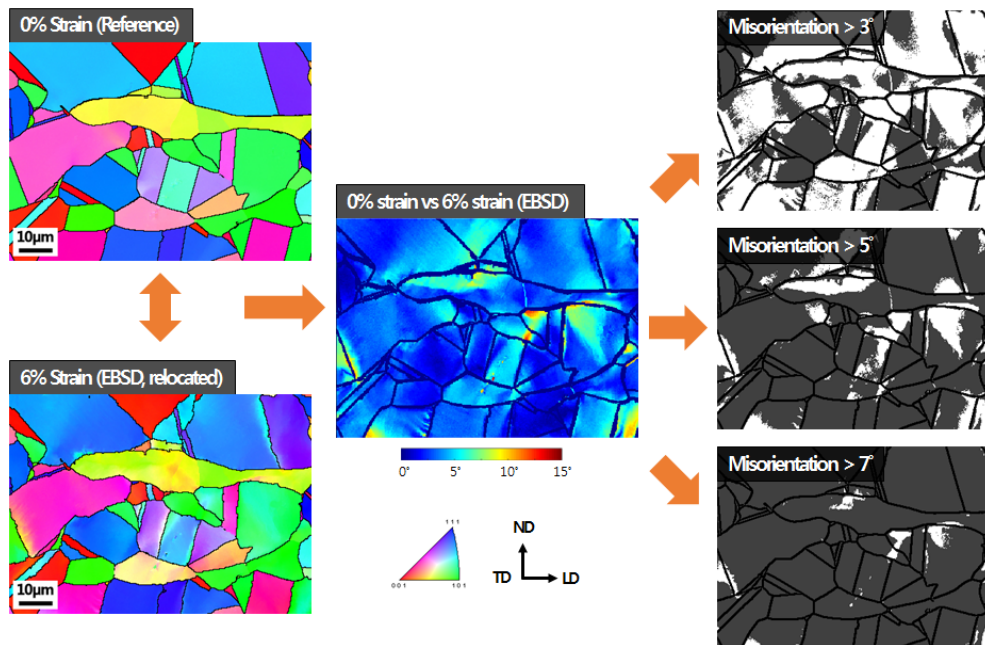


Figure 23. Filtering with misorientation between original crystal orientation and deformed crystal orientation

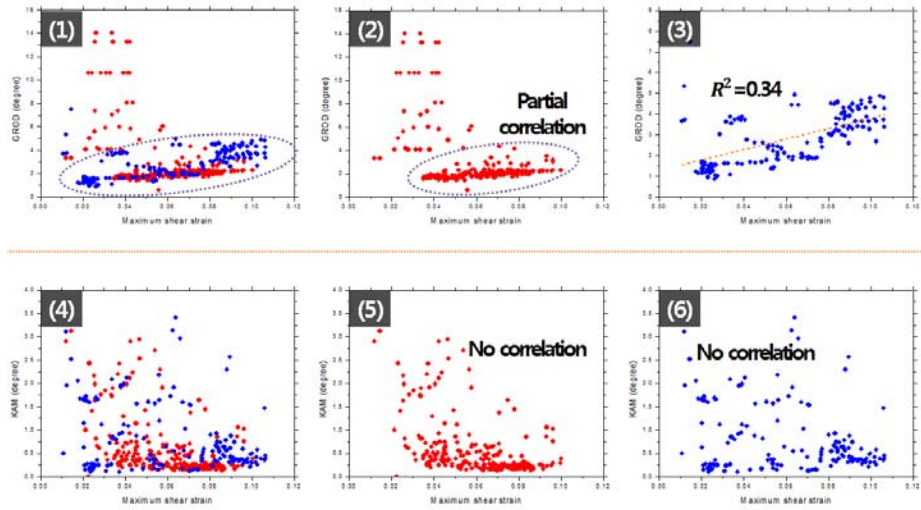


Figure 24. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 2% strain state. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

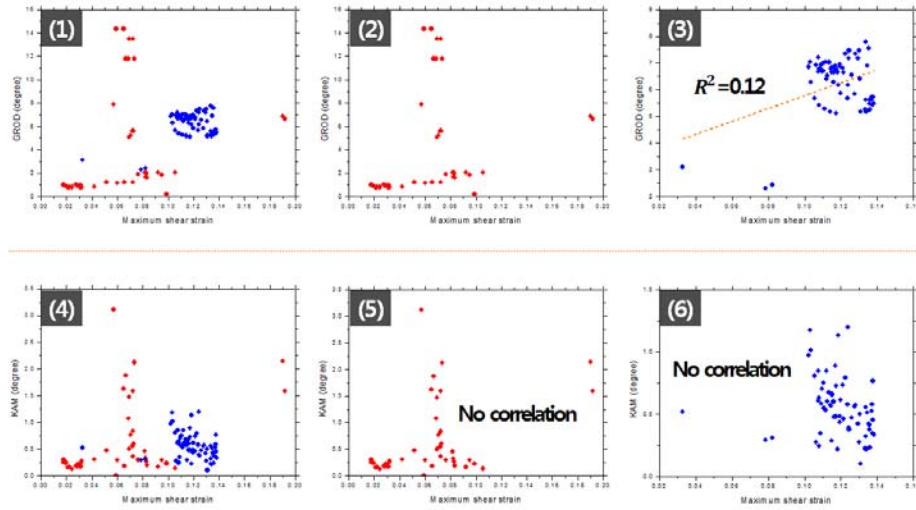


Figure 25. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 4% strain state. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

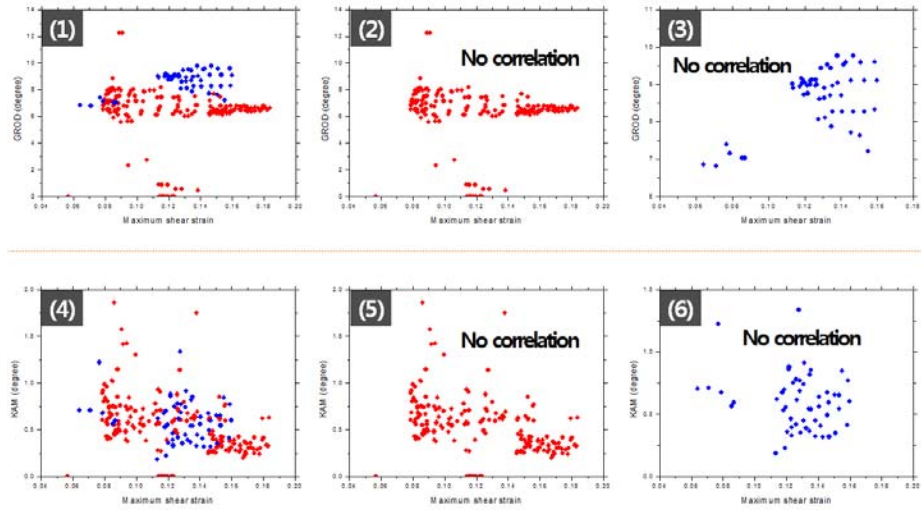


Figure 26. MSS vs GROD graph of (1) austenite and ferrite phase, (2) austenite phase, (3) ferrite phase, MSS vs KAM graph of (4) austenite and ferrite phase, (5) austenite phase, (6) ferrite phase at 6% strain state. (Red: Austenite, Blue: Ferrite)

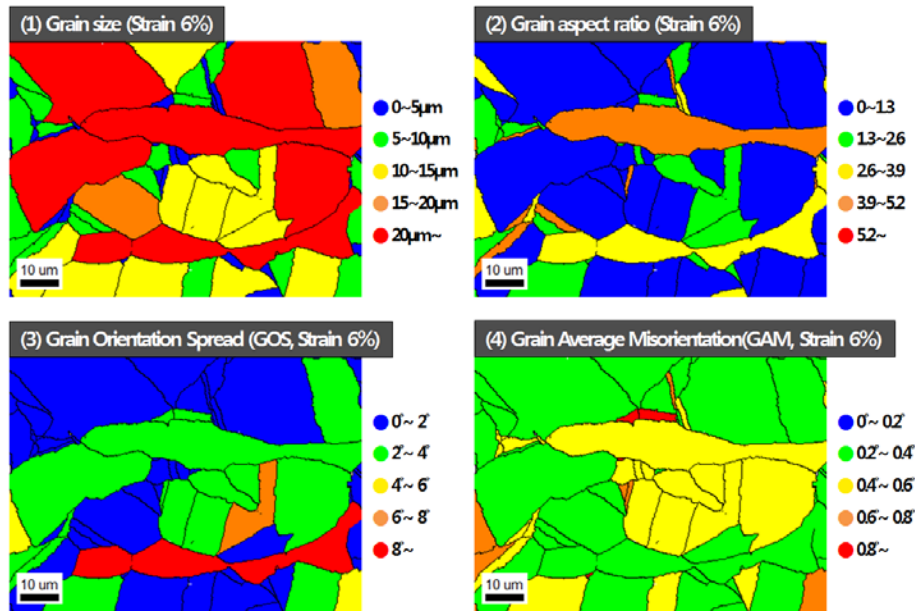


Figure 27. (1) Grain size map, (2) Grain aspect ratio map, (3) Grain orientation spread(GOS) map, (4) Grain average misorientation(GAM) map at 6% strain state

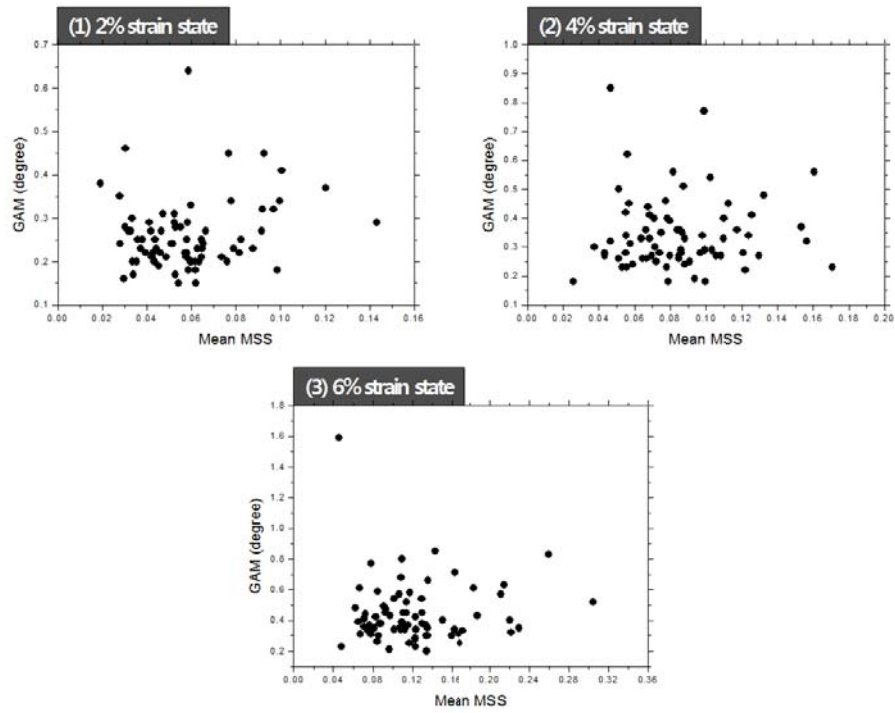


Figure 28. Mean MSS vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

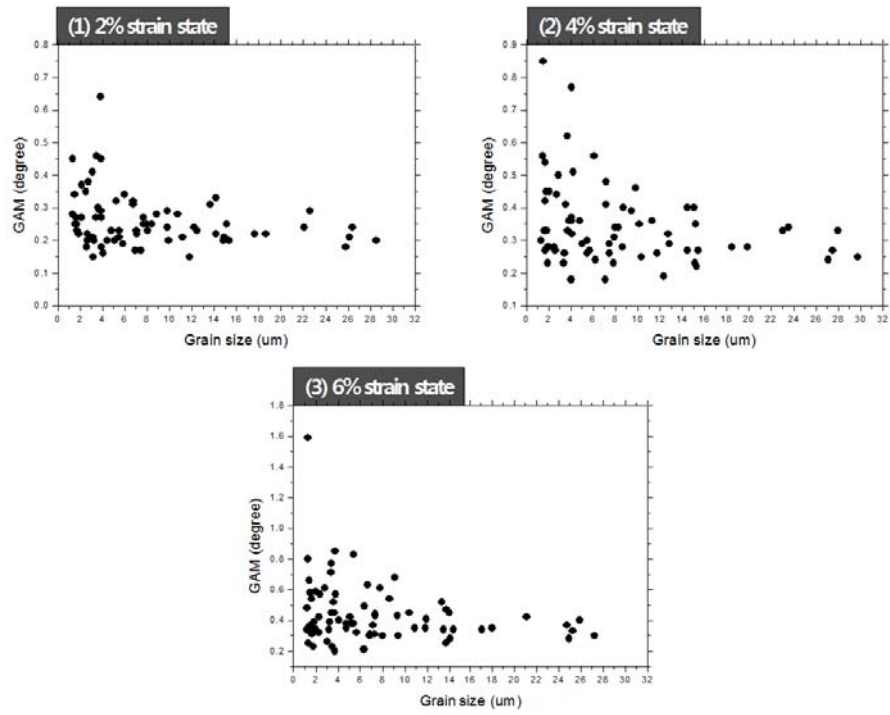


Figure 29. Grain size vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

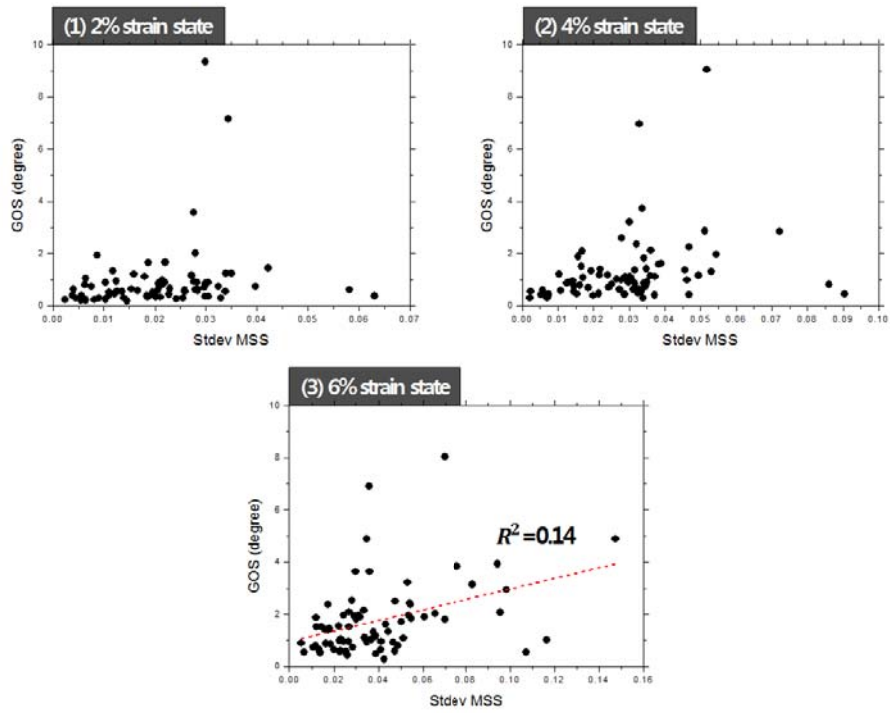


Figure 30. Standard deviation of MSS vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

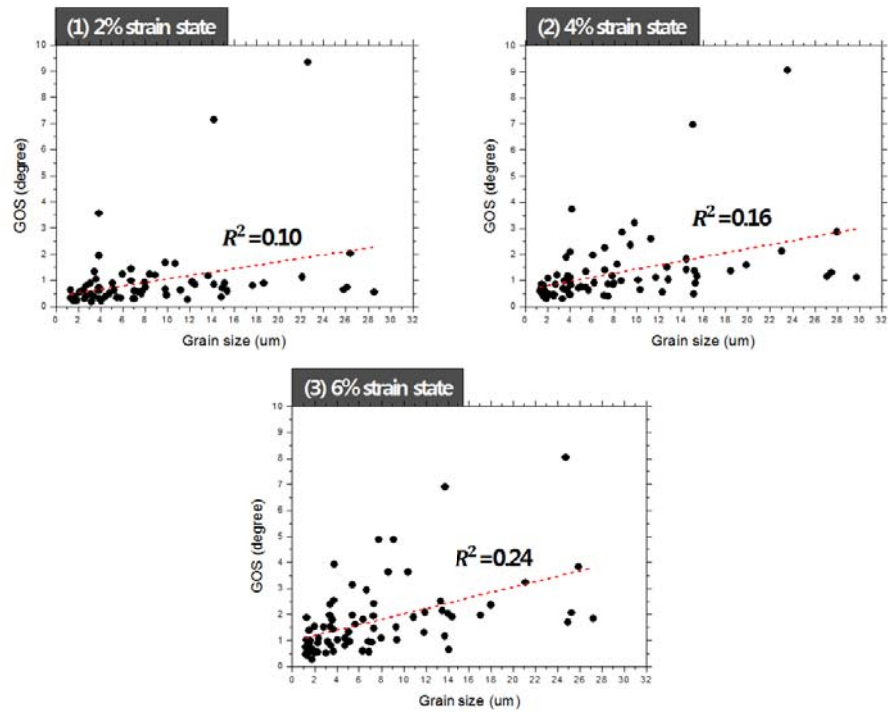


Figure 31. Grain size vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

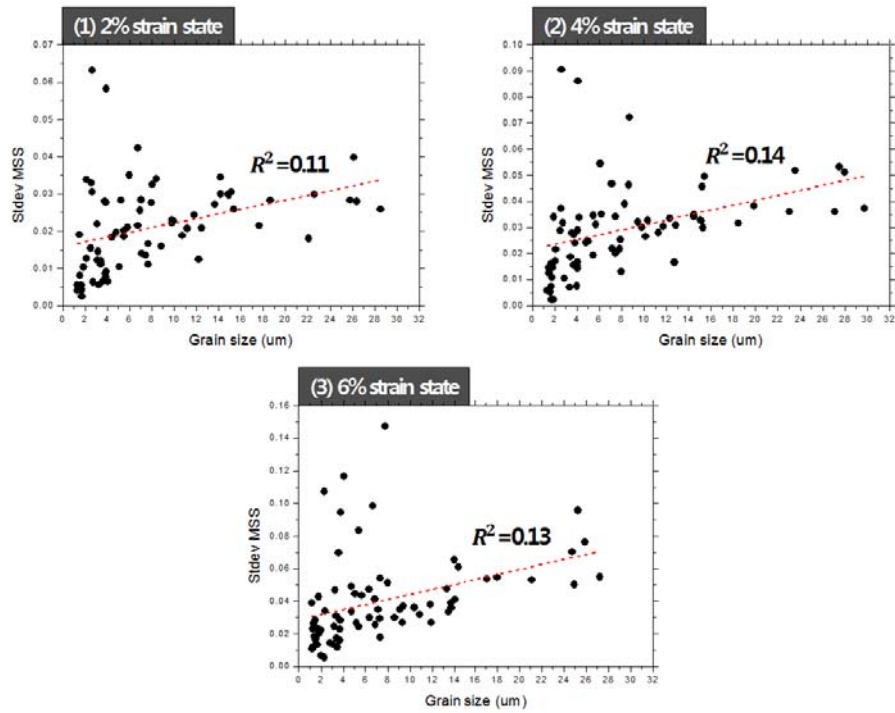


Figure 32. Grain size vs Standard deviation of MSS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

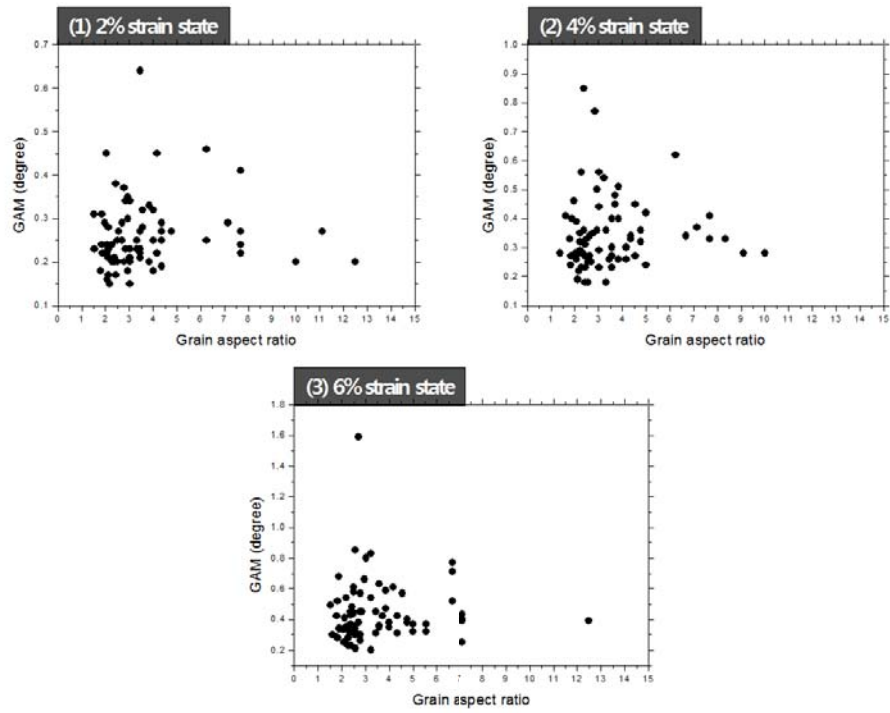


Figure 33. Grain aspect ratio vs GAM graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

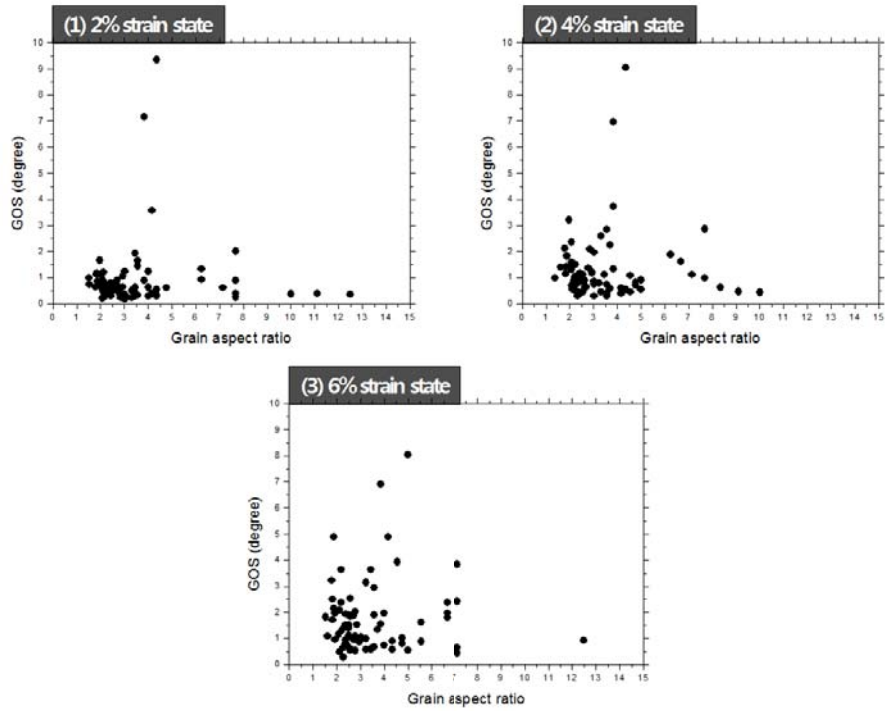


Figure 34. Grain aspect ratio vs GOS graph at (1) 2% strain state, (2) 4% strain state, (3) 6% strain state.

5. 결론

본 연구에서는 DIC 기법을 이용하여 오스테나이트와 페라이트의 두 개의 상으로 구성된 듀플렉스 저비중강의 미세 변형 거동을 분석하였다. 해당 강종은 30wt%의 망간과 10.5wt%의 알루미늄이 첨가된 것을 특징으로 하며 오스테나이트 안정화 원소인 망간이 함유됨으로 인하여 오스테나이트와 페라이트의 이상 구조를 실현되었고 경량 원소인 알루미늄이 함유됨으로 인하여 밀도가 저감되었다.

분석을 위해 DIC 기법을 SEM 및 EBSD와 접목하여 미시 규모에서 분석이 가능하도록 하는 일련의 프로그램을 작성하였으며 이를 이용하여 변형률과 변형 구배 획득은 물론이고 EBSD 데이터와의 픽셀별 1:1 비교가 가능하도록 하였다. 이 점은 기존의 상용 DIC 프로그램과의 차별성이며 사용자의 재량에 따라 필요한 코드를 추가함으로써 다른 분석도 수행할 수 있는 확장성을 가지고 있다.

첫 번째, 기계적 물성을 고려한 상별 미세 변형 분석 파트에서는 최대 전단 변형이 집중되는 영역은 결정립 단위와 일치하지 않는다는 사실을 관찰하였다. 이는 방위의 변형 안정성 이전에 결정립의 형태와 배치 등 구조적인 요소가 미세 변형에 우선적으로 영향을 미치기 때문으로 파악된다. 또한 X 방향 변형률, 전단 변형률, 최대 전단 변형률 모두 변형 초기에 페라이트의 피크가 오스테나이트의 피크보다 좁고 높은 양상을 보였으며 각

상별 평균 변형률은 비슷하였으나 변형률의 표준편차가 페라이트보다 오스테나이트가 컸다는 점은 페라이트보다 오스테나이트가 더욱 불균등하게 변형됨을 의미한다. 또한 이는 나노 압입 시험시 페라이트의 경도 및 압입시의 최대 전단 응력이 오스테나이트보다 높다는, 즉 페라이트 상이 오스테나이트 상보다 변형 저항성이 크며 소성 변형 역시 늦게 시작된다는 것과 상통한다.

두 번째, 결정 방위 예측을 통한 계측 변형률 검증 파트에서는 변형이 진행될수록 방위 차이는 커지며 특정 영역에서 그 차이가 두드러지게 발생하는 경향을 보임을 확인하였다. 이는 Z 방향의 전단 변형은 없다는 가정에 부합하지 않은 영역이 존재하여 이러한 영역에서 발생하는 Z 방향의 전단 변형이 원인임으로 파악하였다. 이것은 2차원 DIC 분석의 한계점을 시사하기도 한다. 이러한 분석을 이용하여 결정립 구분 각도인 15° 이상 차이가 나는 영역은 변형률이 올바르게 검출되지 않은 영역으로 판단하여 추후 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰시 이러한 영역을 제외하는 필터를 만들어 적용하였다.

세 번째, 결정 방위 차이와 미세 변형 사이의 상관성 고찰 파트에서는 KAM, GROD, GOS, GAM 등 결정 방위 뒤틀림 척도와 변형률 사이에는 별다른 상관성이 존재하지 않음이 판명되었으며 이는 기존 연구 결과와도 상통함을 확인하였다. 즉 결정 방위 뒤틀림 척도로부터 변형률을 유추하는 것은 적절치 않다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 관찰 영역 내 모든 픽셀

이 아닌, 각 픽셀별 변형 전 결정 방위와 변형 후 결정 방위 사이의 차이인 결정 방위 회전량을 기준으로 설정하여 특정 회전량 이상의 영역, 즉 변형에 대한 결정 방위 안정성이 낮은 영역만을 선택하여 관찰하였을 때 오스테나이트와 달리 페라이트는 GROD와 최대 전단 변형률 사이에서 선형 상관성이 존재함을 확인하였다. 이는 페라이트는 오스테나이트보다 경도가 높으므로 오스테나이트보다 늦게 변형이 시작되어 변형 적합성의 제한이 크게 감소하므로 결정 방위의 불안정성이 높은 방위부터 선택적으로 변형을 시작할 수 있었기 때문으로 사료된다. 또한 결정립 단위 분석의 경우 결정립의 크기가 최대 전단 응력의 표준편차 및 GOS와 약한 상관성을 나타내고 결정립 종횡비는 GAM, GOS 등에 별다른 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

본 연구는 DIC 기법을 미시적인 규모에 적용함에 있어 EBSD 결정 방위 데이터와 상호 연관한 분석이 가능하도록 하였다는 점에 의의가 있다. 그러나 본 연구에서는 두 개의 상이 혼재해 구조가 복잡한 강종을 선택하였기 때문에 그 변형 거동의 해석이 쉽지 않았다. 그리고 본 연구에서는 분석 대상인 FSD 이미지를 얻는 기준을 변형률 0.5%로 설정하여 6% 변형률까지 총 13장의 최대 해상도 이미지를 확보하였으나 이것은 DIC 분석 대상으로 하기에 충분한 양은 아니다. 따라서 후속 연구로서는 변형 거동이 단순 결정립의 크기가 큰 단상 재료를 연구 대상으로 선정하고 FSD 이미지를 변형률 0.1% 정도의 촘촘한 구간으로 획득하여 충분한 수의 분석 대

상 이미지를 획득하여 분석의 정밀성을 높일 필요가 있다. 또한 본 연구에서 사용된 DIC는 2차원 이미지를 기반으로 하였기 때문에 3차원적인 굴곡이 생기는 경우에는 정확한 변형률 획득이 불가하다는 한계가 존재한다. 따라서 후속 연구에서는 이러한 2차원 DIC의 한계를 극복하기 위한 방법을 강구할 필요가 있다. 거시 규모에서는 2개의 카메라를 이용하여 서로 다른 각도에서 촬영한 2장의 이미지로부터 Z 방향 변위를 도출하는 방법을 사용하는데 SEM 등의 미세 규모에서는 그 구조의 한계상 이미지를 촬영하는 각도가 고정되어있어 이러한 방법을 응용할 수는 없다. 따라서 높이 차이를 정성적으로 보여주는 FSD 이미지를 정량화하는 방법을 개발하거나 실험 전후에 공초점 현미경을 이용해 관찰 영역의 Z 방향 굴곡을 측정하는 식으로 Z 방향 변위를 도출하는 등의 방법을 제안한다. 본 연구를 기반으로 이러한 노력들이 더해져 향후 복잡한 미세 조직을 가진 우수한 구조용 소재의 개발을 위한 기초적 변형 분석 기법은 더욱 발전할 것이다.

참고 문헌

- [1] <http://www.hani.co.kr/arti/international/internationalunit/672191.html>
- [2] Pavel Sztefek et al., Journal of Biomechanics, 43, 2010, 599-605
- [3] Stephen R. Heinz et al., Polymer Testing, Volume 29, Issue 8, 2010, 925-932
- [4] 佐々木孔英 et al., 日本{金属学会誌第, 74卷, 第7号, 2010, 467-474
- [5] Harilal R et al., 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 1-6 November, 2014
- [6] A. Davidkov et al., Materials Science and Engineering: A, Volume 550, 30 2012, 395-407
- [7] Soo-Hyun Joo et al., Scripta Materialia, 68, 2013, 245-248
- [8] David G. Lowe, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 2, 1150-1157
- [9] <http://darkpgmr.tistory.com/116>
- [10] P. Lavaa et al., Optics and Lasers in Engineering, Volume 48, Issue 4, 2010, 457-468
- [11] C. G' Sell et al., Polymer, 34, 1993, 2740-2749
- [12] S. Nazarenko et al., Polymer, 35, 1994, 3883-3891

- [13] A.R. Haynes et al., J Mater Sci, 31, 1996, 1843-1855
- [14] Bing Pan et al., Optics and Lasers in Engineering, 47, 2009, 865-874
- [15] Xiaochang Pan et al., Ultrasonics, 54, 2014, 990-996
- [16] H. Ghadbeigi et al., Materials Science and Engineering: A, Volume 527, Issues 18-19, 2010, 5026-5032
- [17] Keunho Lee et al., Scripta Materialia, Volume 69, Issue 8, 2013, 618-621
- [18] Youngung Jeong et al., Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 20, 2012, 20